

Научный журнал

Учредитель и издатель:

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Издается с января 2017 г.

Периодичность издания 4 раза в год

Scientific journal

Founder and Publisher:

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

Published since January 2017

Periodicity: Quarterly

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

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

Журнал:

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

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

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

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

1.6.14. Геоморфология и палеогеография (*географические*)

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

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

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

1.5.15. Экология (*биологические*)

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

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

The Journal is:

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

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

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

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

1.6.14. Geomorphology and Paleogeography (*Geography*)

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

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

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

1.5.15. Ecology (*Biology*)

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

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

Адрес учредителя и издателя

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

Postal address

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

© ИМГиГ ДВО РАН, 2025

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
- **Марапулец Юрий Валентинович**, д-р физ.-мат. наук, доцент, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка
- **Огородов Станислав Анатольевич**, профессор РАН, д-р геогр. наук, чл.-корр. РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- **Плехов Олег Анатольевич**, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
- **Разжигаева Надежда Глебовна**, д-р геогр. наук, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток
- **Ребetsкий Юрий Леонидович**, д-р физ.-мат. наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва
- **Родкин Михаил Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва
- **Рыбин Анатолий Кузьмич**, д-р физ.-мат. наук, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия

Editorial Board*Editor-in-Chief*

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Executive Secretary

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

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

Редакционная коллегия

- **Сергеева Ирина Вячеславовна**, д-р биол. наук, профессор, Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, Саратов
- **Такахаши Хироаки**, профессор, Институт сейсмологии и вулканологии Университета Хоккайдо, Саппоро, Япония
- **Троицкая Юлия Игоревна**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород; Нижегородский гос. университет им Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
- **Шакиров Ренат Белалович**, д-р геол.-минер. наук, доцент, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. 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 the RAS, Nizhniy Novgorod; Lobachevsky University, Nizhniy Novgorod
- **Renat B. Shakirov**, Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Associate Professor, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- **Georgy V. Shevchenko**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk
- **Alexandre I. Chemenda (Shemenda)**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professeur des Universités de Classe Exceptionnelle, Université de Nice Sophia Antipolis, Nice, France
- **Vladimir V. Yarmolyuk**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the RAS, Moscow

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

Переводчик Чера Анастасия Дмитриевна

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

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

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 13.9.
 Тираж 150 экз. Заказ 8066. Свободная цена.
 Дата выхода в свет 31.03.2025.

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

Translator Anastasiya D. Chera

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

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

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 13.9.
 Number of copies 150. Order no. 8066. Free price.
 Date of publishing 31.03.2025.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Геофизика, сейсмология

- Ю.В. Шевченко.* Некоторые особенности морфологии сейсмофокальной зоны Камчатского региона 5
- Д.А. Сафонов.* Новые переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Сахалинского региона 22

Геофизика. Геотектоника и геодинамика

- П.А. Каменев, А.В. Маринин, Л.А. Сим, Л.М. Богомолов, А.Р. Лукманов, В.А. Дегтярев.* Тектонофизическая цифровая база данных территории острова Сахалин 37

Океанология

- Ю.П. Королев, П.Ю. Королев.* Оценка цунами в Тихом океане, вызванного взрывом вулкана Хунга Тонга–Хунга Хаапай 15 января 2022 г., экспресс-методом оперативного прогноза 56

Механика деформируемого твердого тела.

Математика

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

- В.Б. Тлячев, Д.С. Ушхо.* О траекториях динамической системы Селькова, описывающей автоколебания источников микросейсм 66

Петрология, вулканология

- А.В. Дегтерев.* Эксплозивная активность вулкана Атсонупури в позднем голоцене (о. Итуруп, Южные Курильские острова): предварительные данные 73

Экология. Гидробиология

- Т.Г. Коренева, И.В. Сырбу, А.А. Ведерникова, В.Е. Марыжыхин, А.Д. Мазанова.* Подход к определению региональных нормативов содержания веществ двойного генезиса в морских водах побережья юго-западного Сахалина с учетом естественного гидрохимического фона 92

Хроника научной жизни

- Дальний Восток России в международной морской научной деятельности и в Десятилетии ООН наук об океане в интересах устойчивого развития. *Р.Б. Шакиров, Н.С. Сырбу, А.С. Макушев* 107

От редакции

- Правила оформления и публикации рукописей в журнале «Геосистемы переходных зон» 112

Geophysics, Seismology

- Yu.V. Shevchenko.* Some features of the morphology of the seismic focal zone of the Kamchatka region 5
- D.A. Safonov.* New transition relationships for the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region 22

Geophysics. Geotectonics and geodynamics

- P.A. Kamenev, A.V. Marinin, L.A. Sim, L.M. Bogomolov, A.R. Lukmanov, V.A. Degtyarev.* Tectonophysical digital database of Sakhalin Island 37

Oceanology

- Y.P. Korolev, P.Yu. Korolev.* Assessment of the tsunami in the Pacific Ocean caused by the explosion of the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano on January 15, 2022, using the express method of operational forecasting 56

Mechanics of deformable solids.

Mathematics

BRIEF REPORT

- V.B. Tlachev, D.S. Ushkho.* On the trajectories of the Selkov dynamic system describing the self-oscillation of microseism sources 66

Petrology and volcanology

- A.V. Degterev.* Late Holocene explosive activity of the Atsonupuri volcano (Iturup Island, Southern Kuril Islands): preliminary results. 73

Ecology. Hydrobiology

- T.G. Koreneva, I.V. Syrbu, A.A. Vedernikova, V.E. Maryzhikhin, A.D. Mazanova.* An approach to determining regional standards for the concentration of natural or anthropogenic substances in the coastal waters of southwestern Sakhalin, taking into account the natural hydrochemical background 92

Current scientific events

- The Russian Far East in the international marine scientific activity and the UN Decade of Ocean Sciences for Sustainable Development. *R.B. Shakirov, N.S. Syrbu, A.S. Makushev* 107

From the Editorial Office

- Manuscript formatting and publication guidelines of the “Geosystems of Transition Zones” journal 112

© Автор, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.34

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.005-021>
<https://www.elibrary.ru/tnsita>

Некоторые особенности морфологии сейсмофокальной зоны Камчатского региона

Ю. В. Шевченко

E-mail: klb@emsd.ru

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск Камчатский, Россия

Резюме. Объектом исследования в данной работе является структура сейсмофокальной зоны Камчатского региона как части Курило-Камчатской переходной зоны конвергенции. При исследовании морфологии фокальной зоны выделено семь слоев в соответствии с распределением сейсмической энергии по глубине. На основе инструментальных наблюдений за 60 лет (1962–2021 гг.) для каждого слоя построены карты эпицентров землетрясений Камчатского региона и получены характеристики сейсмичности: количество событий, глубины пиковых значений энергии, суммарная энергия, отношение суммарной энергии землетрясений выше 14 класса к суммарной энергии землетрясений от 10 до 14 класса. Почти половина всей сейсмической энергии региона за 60 лет пришлась на глубины более 550 км. Обнаружены особенности в распределении землетрясений: количество их на внешнем склоне желоба (вал Зенкевича) к юго-западу от Авачинского залива больше, чем к северо-востоку; в слое на глубинах 80–130 км эпицентры землетрясений в Камчатском заливе маркируют протяженный линеймент, на продолжение которого попадают вулканы Ключевской группы и вулкан Толбачик; полоса землетрясений для глубин 130–180 км накладывается на структуру вулканического пояса. На вертикальной проекции гипоцентров участка сейсмофокальной зоны к югу от п-ова Шипунский выделяется круто падающий разлом, отсекающий подвижный блок фронтального участка от континентальной литосферы. На проекции участка фокального слоя, включающего вулкан Толбачик и Ключевскую группу вулканов, обнаружен вертикальный излом под вулканами на глубине 140–180 км. На основе представленных в статье данных предложена гипотеза, объясняющая морфологию сейсмофокальной зоны не только погружением океанической литосферы, но и мантийным течением, направленным к юго-востоку из-под окраины Азии.

Ключевые слова: землетрясение, Курило-Камчатская островная дуга, морфология сейсмофокальной зоны, Камчатка

Some features of the morphology of the seismic focal zone of the Kamchatka region

Yury V. Shevchenko

E-mail: klb@emsd.ru

Kamchatka Branch of the FRC "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences",
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract. The object of study in this paper is the structure of the seismic focal zone of the Kamchatka region as a part of the Kuril-Kamchatka transitional convergence zone. When studying the morphology of the focal zone, seven layers were distinguished in accordance with the distribution of seismic energy by depth. Based on instrumental observations over 60 years (1962–2021), the maps of earthquake epicenters in the Kamchatka region were constructed for each layer, and seismicity characteristics were obtained: the number of events, depths of peak energy values, total energy, and the ratio of the total energy of earthquakes above class 14 to the total energy of earthquakes from class 10 to 14. Almost half of all seismic energy in the region over 60 years occurred at depths greater than 550 km. Features in the distribution of earthquakes were discovered: their number on the outer slope of the trench (Zenkevich Swell) to the SW of the Avacha Bay is greater than to the NE; in the layer at depths of 80–130 km, the epicenters of earthquakes in the Kamchatka Bay mark an extended lineament, the continuation of which includes the volcanoes of the Klyuchevskaya group and the Tolbachik volcano; the band of earthquakes for depths of 130–180 km and the

structure of the volcanic belt overlap. On the vertical projection of the hypocenters of the section of the seismic focal zone to the south of the Shipunsky Peninsula, a steeply dipping fault separating the moving block of the frontal section from the continental lithosphere is distinguished. On the projection of the focal layer section, including the Tolbachik volcano and the Klyuchevskaya group of volcanoes, a vertical fracture was found under the volcanoes at a depth of 140–180 km. Based on the data presented in the article, a hypothesis explaining the morphology of the seismic focal zone not only by the subsidence of the oceanic lithosphere but also by the mantle flow directed to the SE from under the margin of Asia is proposed.

Keywords: earthquake, Kurile-Kamchatka island arc, morphology of the seismic focal zone, Kamchatka

Для цитирования: Шевченко Ю.В. Некоторые особенности морфологии сейсмофокальной зоны Камчатского региона. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 1, с. 5–21. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.005-021>; <https://www.elibrary.ru/tnsita>

For citation: Shevchenko Yu.V. Some features of the morphology of the seismic focal zone of the Kamchatka region. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 1, pp. 5–21. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.005-021>; <https://www.elibrary.ru/tnsita>

Финансирование и благодарности

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования Камчатского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». Автор благодарит С.А. Шевченко за помощь в подготовке иллюстраций для статьи.

Funding and Acknowledgements

The work was carried out within the framework of budgetary funding of the Kamchatka Branch of the FRC “United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”. The author expresses his gratitude to Svetlana A. Shevchenko for assistance in preparing illustrations for this article.

Введение

Сейсмичность Курило-Камчатского звена Тихоокеанского сейсмического пояса по уровню близка к максимальной на планете. Среди многих задач при изучении сейсмичности региона можно выделить исследования структуры сейсмичности фокального пояса. По существу, изучение строения сейсмофокальной (СФ) зоны Курило-Камчатской дуги началось после создания к 1961 г. сети сейсмических станций [1, 2].

Одним из первых содержательных исследований строения переходной зоны от океана к континенту в районе Камчатки была работа [3]. На основе изучения времен пробега сейсмических волн были определены основные черты тектоники Камчатки, особенности ее строения и оценены некоторые физические параметры верхней мантии Курило-Камчатской дуги.

В статье [4] построены поперечные разрезы сейсмофокальной зоны Камчатки и сделан вывод о сходстве их формы и строения вдоль Камчатки. Показано двухслойное строение фокальной зоны и положение области максимальной сейсмичности на глубинах 0–40 км.

Карты распределения эпицентров землетрясений энергетического класса $K > 8.5$ для

5 слоев (0–50, 51–100, 101–150, 151–200, 201–250 км) за 20 лет наблюдений и вертикальные разрезы вкост СФ зоны в районе п-ова Шипунский и п-ова Камчатский представлены в работе [5]. Сделан вывод, что основная часть землетрясений, включая наиболее сильные, происходит между восточным побережьем Камчатки и желобом на глубинах до 100 км. Подтверждено двухслойное расположение очагов в наклонной части фокального слоя.

Работа [6] содержит обзор коровой тектонической сейсмичности суши Камчатки на глубинах до 50 км. Выделены участки повышенной концентрации землетрясений, сделана попытка сопоставить структурную организацию этих участков с разломными зонами.

В статье [7] представлены закономерности распределения слабых землетрясений классов 8–10. Построены 17 поперечных и 5 продольных разрезов фокального слоя Камчатки. Дано объяснение наличию двойного сейсмофокального слоя в рамках концепции дегидратации океанической литосферы.

В настоящей статье на основе расширенного объема данных инструментальных наблюдений за сейсмичностью с 1962 по 2021 г. уточняются особенности структуры сейсмофокальной зоны Камчатского региона. На рис. 1 а

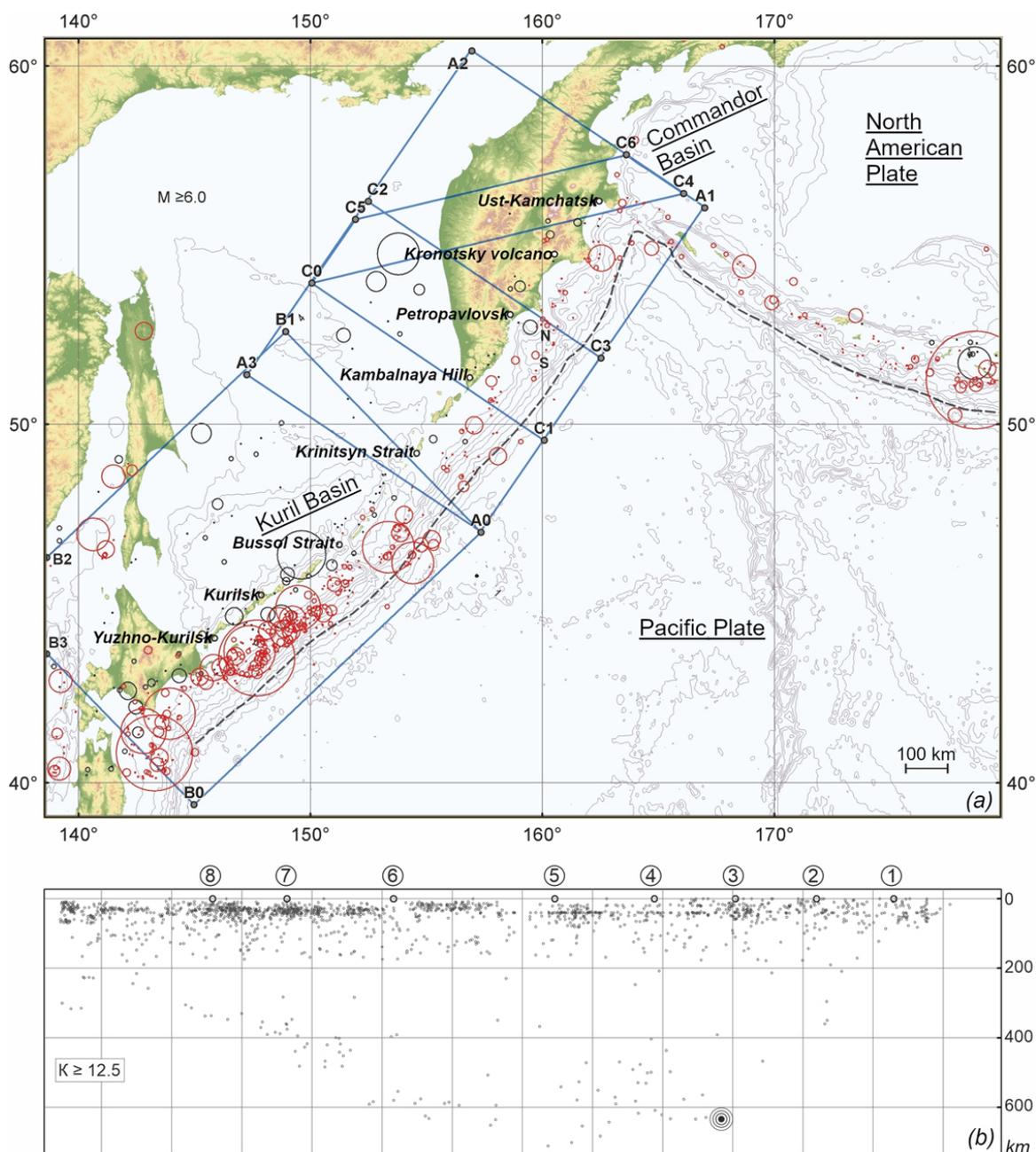


Рис. 1. (а) Карта распределения эпицентров землетрясений с $M \geq 6$ в Курило-Камчатской и западной части Алеутской островодужных системах за период инструментальных наблюдений с 1962 по 2021 г. Очаги землетрясений показаны кругами, площади которых в масштабе карты соответствуют площади очагов. Черными кругами обозначены события с глубиной более 100 км, красными – менее 100 км. S, N – положение южного и северного блоков хребта Шатского. Прямоугольником $A_0-A_1-A_2-A_3$ на карте выделен участок, именуемый в дальнейшем «Камчатский регион». Морфологические оси желобов обозначены пунктиром. (б) Проекция на вертикальный профиль $B_0-A_0-A_1$ гипоцентров землетрясений класса $K \geq 12.5$ участков $A_0-A_1-A_2-A_3$ и $B_0-A_0-B_1-B_2-B_3$. Окружности с точкой в центре отмечают позицию гипоцентра Охотоморского землетрясения ($M = 8.3$). Номера соответствуют пунктам на карте: 1 – Усть-Камчатск, 2 – вулкан Кронотский, 3 – Петропавловск, 4 – вулкан Камбальная Сопка, 5 – прол. Криницына, 6 – прол. Буссоль, 7 – Курильск, 8 – Южно-Курильск.

Fig. 1. (a) Map of the distribution of the earthquake epicenters with $M \geq 6$ in the Kuril-Kamchatka and western Aleutian island arc systems for the period of instrumental observations from 1962 to 2021. Earthquake foci are shown as circles, the areas of which on the map scale correspond to the area of the foci. Black circles denote events with a depth of more than 100 km, red ones denote less than 100 km. S and N indicate position of the southern and northern blocks of the Shatsky Ridge. Rectangle $A_0-A_1-A_2-A_3$ highlights the area hereinafter referred to as “the Kamchatka region” on the map. The morphological axes of the trenches are indicated by a dotted line. (b) Projection of hypocenters of $K \geq 12.5$ class earthquakes of $A_0-A_1-A_2-A_3$ and $B_0-A_0-B_1-B_2-B_3$ sections onto vertical profile $B_0-A_0-A_1$. Circles with a dot in the center indicate the position of the hypocenter of the Sea of Okhotsk earthquake ($M = 8.3$). The numbers correspond to the map points: 1 – Ust-Kamchatsk; 2 – Kronotsky volcano; 3 – Petropavlovsk; 4 – Kambalnaya Sopka volcano; 5 – Krinitsyn strait; 6 – Bussol strait; 7 – Kurilsk; 8 – Yuzhno-Kurilsk.

показано распределение эпицентров землетрясений с $M \geq 6$ в Курило-Камчатской и западной части Алеутской островодужных системах за период с 1962 по 2021 г. Для более адекватного представления сейсмичности региона очаги землетрясений показаны кругами, площади которых в масштабе карты соответствуют площади очагов. Расчет размеров очагов землетрясений выполнен автором в соответствии с моделью круговой трещины [8]. Для событий с глубиной очага до 100 км принималось значение сброшенного напряжения $\Delta\sigma = 3$ МПа [9, 10]. Глубже сброшенное напряжение менялось пропорционально модулю сдвига в соответствии с моделью земли ak135 [11].

Материалы

В целях исследования использованы данные о землетрясениях с 1962 по 2021 г. из каталога КФ ЕГС РАН [12, 13], каталога ISC (International Seismological Centre) [14] и каталога СМТ (Centroid-Moment-Tensor) [15, 16]. За этот период менялись количество действующих станций и апертура сети в Курило-Камчатском регионе. С 1996 г. начался переход на цифровую регистрацию. Все это позволило снизить представительную величину класса регистрируемых землетрясений. Чтобы получить однородную выборку событий за весь период наблюдений, использовались землетрясения начиная с 10 класса [17] в пределах выделенной на карте (рис. 1 а) прямоугольной области A_0 – A_1 – A_2 – A_3 (14 465 событий), которую мы называем Камчатским регионом.

Результаты

Северо-восточная граница Камчатского региона проходит немного севернее участка сочленения Курило-Камчатской и западной части Алеутской островодужных систем. Юго-западная граница пересекает Курильскую островную дугу немного южнее прол. Криницына, разделяя северную и центральную части Курильской дуги. На рис. 1 видно, что на этой границе меняется характер сейсмичности:

вдоль границы глубоких землетрясений почти нет, к юго-западу сильных глубоких землетрясений мало, северо-восточнее наблюдается высокая сейсмическая активность на больших глубинах. Строение земной коры севернее и южнее выбранной границы также различно. В работе [18] приводятся важные различия в структуре фланговых участков Курильской островной дуги и ее центрального звена. По материалам геологических и геофизических исследований для осадочных толщ получены значения: 3.5–5 км на юго-западе, 7–7.5 км на северо-востоке, 1.5–2 км в центре. Мощность земной коры резко меняется от северо-восточного и юго-западного участков островной дуги к центральной части приблизительно с 30 км до 10 км. В плане конфигурация изогипс мощности осадков и кристаллической части земной коры имеет на фланговых участках V-образную форму, постепенно выклиниваясь к центру островной дуги.

Для Камчатского региона большинство землетрясений класса $K \geq 10$ имеет тектоническую природу и происходит в СФ зоне Вадати–Заварицкого–Беньофа как результат взаимодействия литосферных плит при субдукции океанической плиты. При погружении Тихоокеанской литосферной плиты землетрясения наблюдаются до глубин около 700 км. Сейсмическая активность (количество событий и энергия) на разных глубинах заметно меняется, поэтому целесообразно рассмотреть параметры сейсмического режима послойно. Изменение сейсмической энергии \bar{E} и числа землетрясений с глубиной для Камчатского региона иллюстрируется графиками на рис. 2. До глубины 200 км средние проводилось с шагом 10 км, глубже – с шагом 20 км. В соответствии с положением максимумов \bar{E} выделено 7 сейсмофокальных слоев с глубинами 0–35, 35–80, 80–130, 130–180, 180–230, 230–550, 550–700 км.

Фронтальный участок СФ зоны, на котором океаническая литосферная плита начинает погружаться под Камчатку и Курильскую островную дугу, относится к верхнему слою с глубиной до 35 км. Землетрясения в этом слое происходят в результате жесткого контакта и деформации сдвигающихся литосферных

плит. Сжатие континентальной литосферы вызывает хрупкие разрушения по множеству разломов между блоками земной коры и создает основную массу землетрясений. Сильнейшие землетрясения, связанные с пологими сдвигами/надвигами, происходят в пределах верхних двух слоев. На глубины 0–80 км приходится более 85 % событий $K \geq 10$ (см. таблицу).

Первый максимум \bar{E} приходится на глубину 15 км, второй – на глубину 45 км (рис. 2). Для первого и второго слоев сейсмически активной зоны характерно огромное количество событий за счет землетрясений небольших классов. Слабым землетрясениям отвечает рассеянная сейсмичность, связанная с мелкоблочной раздробленностью среды. Крупным

разломам сейсмически активной зоны соответствует сравнительно небольшое количество сильных событий, которые вносят основной вклад в суммарную энергию. Как правило, чем сильнее землетрясение, тем более надежно определяется его положение, поскольку вступления сейсмических волн уверенно выделяются на большем числе станций. Использование при построении карт всей выборки землетрясений (в первом слое это 6427 событий) делает картину смазанной за счет рассеянной сейсмичности. Поэтому при построении послойного распределения эпицентров на картах мелкого масштаба можно до некоторой степени игнорировать слабые события. Такой подход позволит лучше представить структуру сейсмичности

Таблица. Характеристики сейсмичности сейсмофокальной зоны Камчатского региона для разных глубин
Table. Seismicity characteristics of the seismic focal zone of the Kamchatka region for different depths

Слой	Глубина, км	n	E_c , Дж	h_p , км	k
1	0–35	6427	$1.3E+16$	15	3.2
2	35–80	5824	$1.5E+16$	45	2.7
3	80–130	989	$8.0E+15$	115	14
4	130–180	445	$4.8E+15$	175	22
5	180–230	127	$2.6E+15$	210	71
6	230–550	481	$1.6E+15$	490	3.9
7	550–700	172	$1.4E+17$	630	830

Примечания. n – количество событий в слое; E_c – суммарная энергия в слое; h_p – глубина для пиковых значений \bar{E} ; $k = \sum E(K \geq 14) / \sum E(10 \leq K < 14)$ – отношение суммарной энергии землетрясений класса $K \geq 14$ к суммарной энергии землетрясений класса от 10 до 14.

Notes. n , number of events in the layer; E_c , total energy in the layer; h_p , depths of peak values (\bar{E}); $k = \sum E(K \geq 14) / \sum E(10 \leq K < 14)$ indicates ratio of the total energy of earthquakes $K \geq 14$ to the total energy of earthquakes class from 10 to 14.

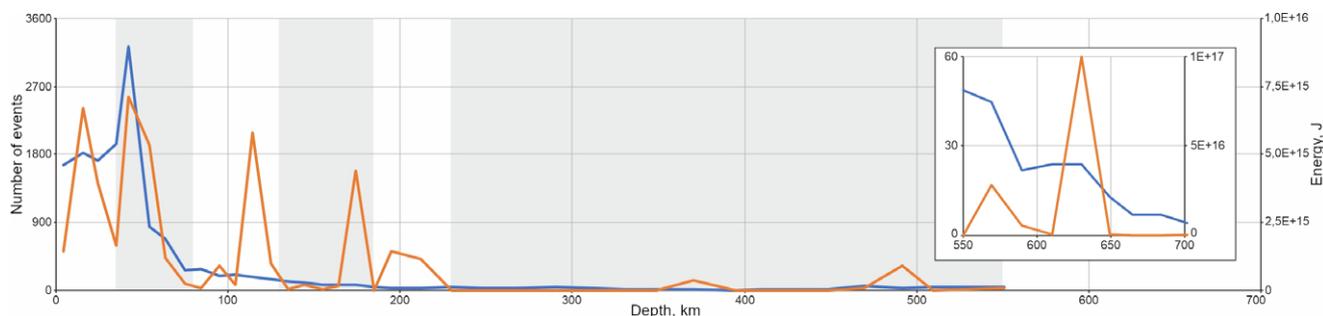


Рис. 2. Распределение сейсмической энергии (оранжевая линия) и числа землетрясений (синяя линия) по глубине для Камчатского региона. Чередованием тонировки и ее отсутствия отмечены фокальные слои, выделенные для анализа. Масштаб графиков на врезке для глубин 550–700 км увеличен.

Fig. 2. Distribution of seismic energy (orange line) and the number of earthquakes (blue line) by depth for the Kamchatka region. Shading separates the boundaries of the focal layers selected for the analysis. The scale of the graphs in the inset for depths of 550–700 km is increased.

фокальной зоны. Распределение эпицентров землетрясений Камчатского региона для первого и второго слоев показано на рис. 3 а, б.

В соответствии с принятыми представлениями, сложные тектонические движения при землетрясениях в первом слое можно условно разбить на три вида подвижек: пологие сдвиги/надвиги по контактной поверхности в зоне подвига, вызывающие наиболее крупные землетрясения; падающие под океан крутые взбросы с простираем вдоль желоба, связанные со сжатием фронтального выступа континентальной коры; разрывы, ориентированные поперек к простираению Курило-Камчатского желоба по границе контакта между соседними блоками нависающей коры [19, 20, 21, 22]. Группирование землетрясений на внутреннем склоне желоба, иногда в форме изогнутых полос (рис. 3 а), маркирует разломы между крупными блоками выступающих частей фронтального выступа. Привлекает вни-

мание блок между о. Парамушир и Авачинским заливом размером около 300 км вдоль СФ зоны. На участок СФ зоны, занимаемый этим блоком, приходится очаг землетрясения 04.11.1952 с магнитудой 8.5. Поперечные разломы севернее п-ова Шипунский развернуты на запад и разделяют блоки значительно меньшего размера (рис. 3 а, б). Возможно, разворот разломов вызван изменением направления погружения сегмента субдуцирующей плиты и появлением к северу от Авачинского залива ЮЗ компоненты смещения вдоль желоба (косая субдукция). Как следствие, можно предположить, что подводные горы и хребты на этом участке континентального склона Камчатки – складки при деформации фронтального выступа.

На рис. 3 а количество землетрясений на внешнем склоне желоба в юго-западной части СФ зоны больше, чем в северо-восточной, причем граница изменений проходит на юге

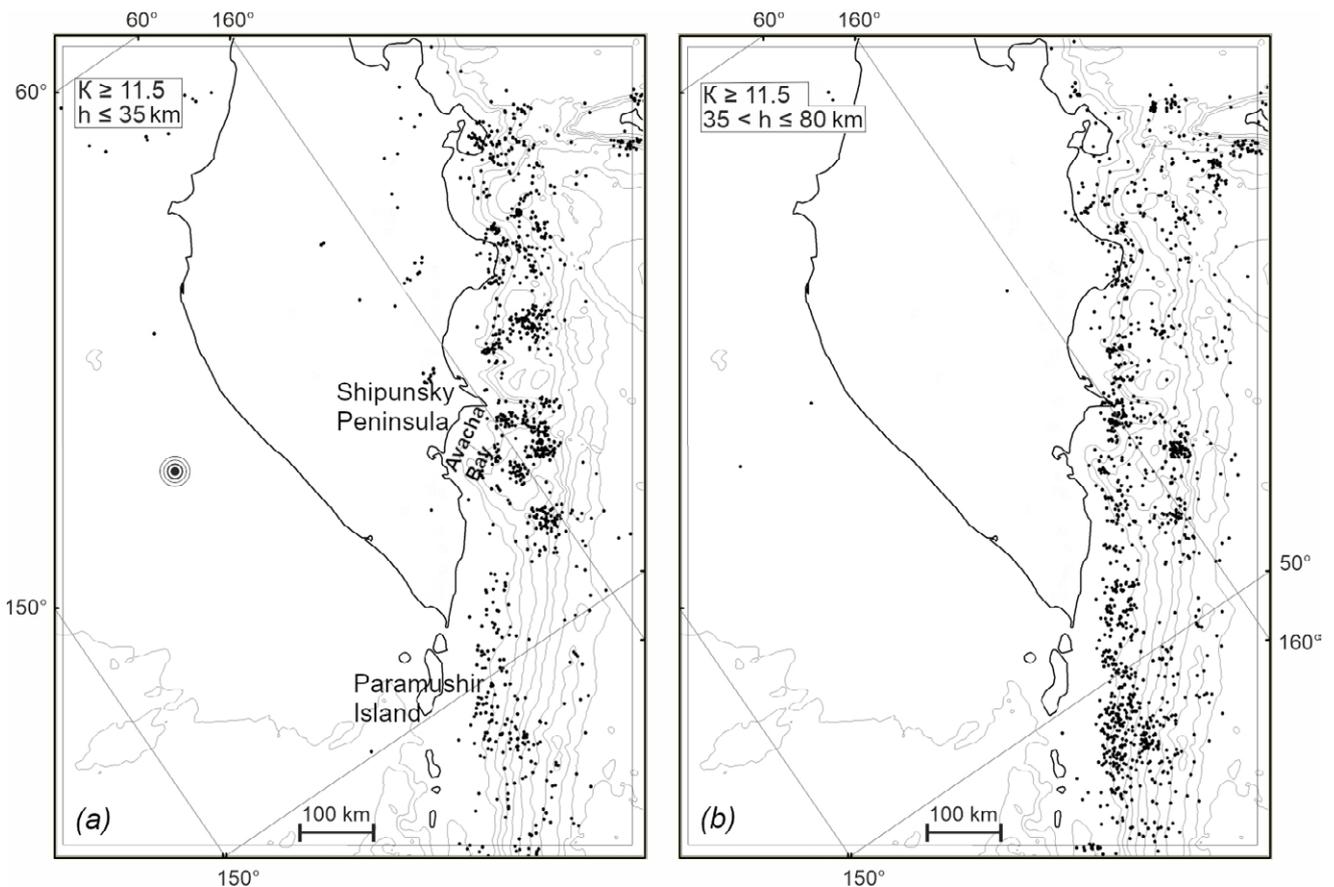


Рис. 3. Эпицентры землетрясений для первого (а) и второго (б) сейсмофокальных слоев Камчатского региона. Окружностями с точкой в центре отмечена позиция гипоцентра Охотоморского землетрясения ($M = 8.3$).

Fig. 3. Earthquake epicenters for the first (a) and second (b) seismic focal layers of the Kamchatka region. Circles with a dot in the center indicate the position of the hypocenter of the Sea of Okhotsk earthquake ($M = 8.3$).

Авачинского залива. Такая картина распределения землетрясений возможна в том случае, если линия начала взаимодействия континентальной и океанической плит к ЮЗ от Авачинского залива сдвинута к океану. Объяснить это можно тем, что складчатые структуры п-ова Камчатка на широте Петропавловска-Камчатского поворачивают на ЮВ и фронтальный выступ к ЮЗ от Авачинского залива больше выдвинут в сторону океана. Можно предположить, что от южного блока хребта Шатского (рис. 1 а) между этими сегментами фронтальных выступов проходит крупный поперечный разлом континентальной литосферы СЗ простирания. Исследованиями магнитных и гравитационных полей [23] выявлено наличие на юге Авачинского залива аномалий, поперечных к простиранию СФ зоны. Эти факты подтверждают выдвинутое предположение.

Примерно в 100 км от оси желоба, на глубинах 35–80 км, океаническая литосферная плита взаимодействует с мантийной частью континентальной литосферы. На рис. 3 а, б привлекает внимание четкая граница между зоной высокой сейсмичности и асейсмической зоной, пролегающая вдоль внутреннего склона желоба. Можно допустить, что к СЗ от границы на глубинах 35–80 км начинается сравнительно однородная и прочная мантийная часть континентальной литосферы. Жесткое взаимодействие слэба с мантийной частью континентальной литосферы является причиной изгиба слэба и вызывает землетрясения в океанической коре и фронтальном выступе континентальной коры к ЮВ от этой границы.

Изгиб океанической плиты, растяжение ее верхней стороны и сжатие нижней приводят к формированию краевого вала. Как следствие, на внешнем склоне желоба возникают мелкофокусные землетрясения, появляются разрывные нарушения и ступенчатые структуры океанической коры [23]. На рис. 4 а показаны механизмы наиболее сильных за время наблюдений землетрясений с внешней стороны желоба.

Из 18 представленных на рис. 4 а землетрясений 13 произошли на глубине 10–20 км, механизмы их очагов соответствуют сбросам. Пять землетрясений на этом рисунке с глуби-

нами около 40 км относятся к взбросам. Среднее простирание для всех событий совпадает с линией по азимуту 45 (среднеквадратичное отклонение 30), т.е. почти вдоль желоба.

На рис. 4 б показана проекция гипоцентров землетрясений полигона С₁–С₃–С₂–С₀ на вертикальную плоскость С₂–С₃. На этой проекции субвертикальная полоса группирования землетрясений маркирует круто падающий разлом, отсекающий подвижный блок фронтального участка континентальной коры. Разлом опускается до глубин около 50 км и заканчивается у оси желоба (стрелка на рис. 4 б). С подвижками по разломам этого типа, «поршневого» в терминологии [22], связывают образование тектонических террас на внутренних склонах желобов. На проекции гипоцентров полигона А₀–С₁–С₀–А₃ на профиль С₀–С₁ для участка СФ зоны напротив Северных Курил (рис. 4 с) сложно выделить отсекающий субвертикальный разлом. Возможно, подвижки «поршневого» типа в этом случае попадают на участок континентальной коры, разбитой на сравнительно небольшие блоки, и, в зависимости от позиции менее консолидированной границы между блоками, положение разлома при землетрясениях меняется.

Количество событий и суммарная энергия E_c в третьем (80–130 км) и четвертом (130–180 км) слоях в несколько раз меньше, чем во втором, однако растет доля сильных событий ($k \approx 15$ и $k \approx 22$). Пик \bar{E} соответствует глубинам 115 и 175 км (см. таблицу). Землетрясения в слоях распределены полосой без сгущений вдоль СФ зоны (рис. 5 а, б), исключая протяженный узкий линеамент на глубинах 80–130 км в Камчатском заливе, маркирующий разлом, рассекающий литосферу океанической плиты. Вулканы Ключевской группы и вулкан Толбачик попадают на продолжение этого разлома.

На уровне третьего слоя основная часть землетрясений происходит путем релаксации остаточных упругих деформаций на ослабленных участках океанической плиты [24].

Сейсмичность в четвертом слое, в рамках концепции существования серпентинитового слоя, подстилающего океаническую плиту [25, 26], а также серпентинизации пород океанической коры, насыщенных водой

перед погружением, коррелирует с процессом дегидратации и образованием водного флюида [24, 25, 27, 20, 23, 28]. Образование магмы связывают с плавлением пород океанической коры и мантийного клина под воздействием

флюидов [20]. На рис. 5 б полоса землетрясений для глубин 130–180 км накладывается на вулканический пояс, что можно объяснить расположением на этом уровне зоны образования первичной магмы.

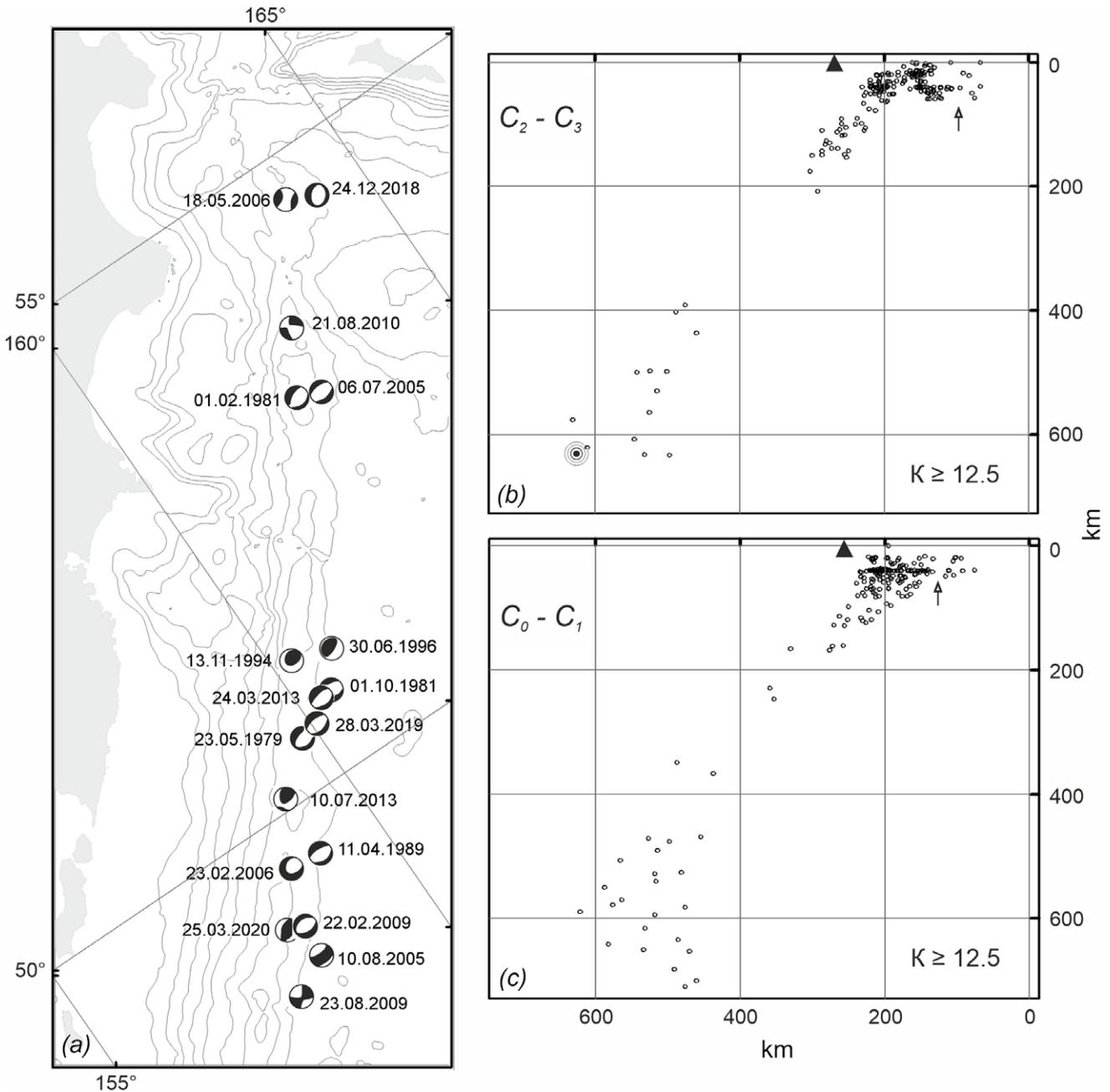


Рис. 4. (а) Эпицентры землетрясений на внешнем склоне желоба (механизмы землетрясений из каталога СМТ [15, 16]). (б) Проекция на вертикальную плоскость C_2-C_3 гипоцентров землетрясений полигона $C_1-C_3-C_2-C_0$ (рис. 1 а). (с) Проекция на вертикальную плоскость C_0-C_1 гипоцентров землетрясений полигона $A_0-C_1-C_0-A_3$. Треугольниками обозначены вулканы Авачинский (C_2-C_3) и Камбальная Сопка (C_0-C_1). Стрелками указано положение желоба. Окружности с точкой в центре отмечают позицию гипоцентра Охотоморского землетрясения.

Fig. 4. (a) Epicenters of earthquakes on the outer slope of the trench (earthquake mechanisms from the CMT catalog [15, 16]). (b) Projection onto the vertical plane C_2-C_3 of the hypocenters of earthquakes in the $C_1-C_3-C_2-C_0$ test site (Fig. 1 a). (c) Projection onto the vertical plane C_0-C_1 of the hypocenters of earthquakes in the $A_0-C_1-C_0-A_3$ test site. Triangles indicate Avachinsky volcano (C_2-C_3) and Kambalnaya Sopka (C_0-C_1). Arrows indicate the position of the trench. Circles with a dot in the center indicate the position of the hypocenter of the Sea of Okhotsk earthquake.

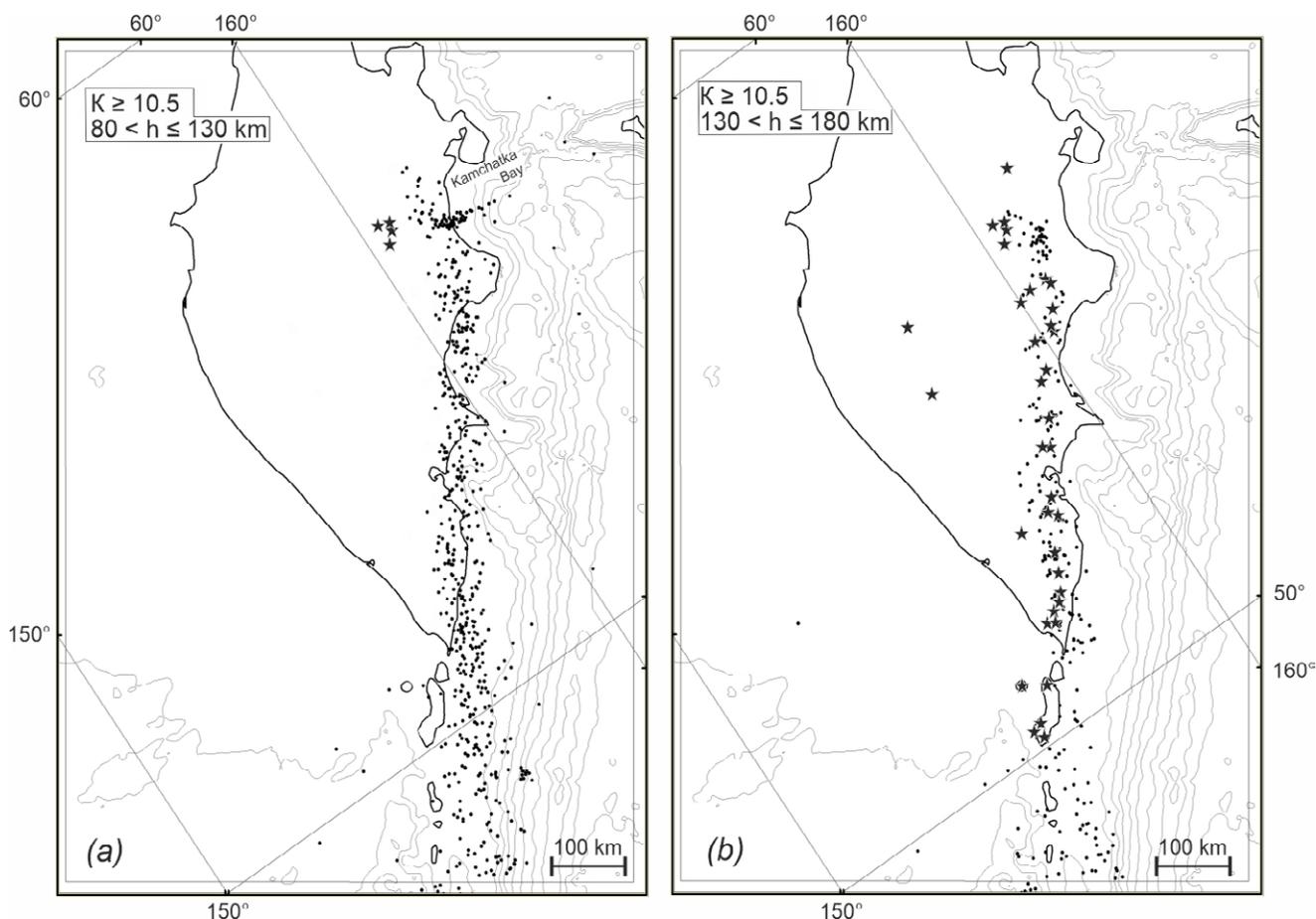


Рис. 5. Эпицентры землетрясений для третьего (а) и четвертого (б) фокальных слоев. Вулканы обозначены звездочками.
 Fig. 5. Earthquake epicenters for the third (a) and fourth (b) focal layers. Volcanoes are marked with asterisks.

На рис. 6 показана проекция гипоцентров землетрясений полигона $C_0-C_4-C_6-C_5$ на вертикальную плоскость C_0-C_4 . СФ зона на проекции C_0-C_4 образует вертикальный излом под вулканами Толбачик и Ключевской на глубинах 140–180 км. Возможно, здесь по краю слэба существует трещина, открывающая доступ вещества астеносферы из-под океанической плиты.

В пятом слое СФ зоны (рис. 7 а) количество событий сравнительно мало, велика доля сильных событий ($k \approx 71$). Примерно на этих глубинах происходит сближение двойных сейсмических зон, связанных с дегидратацией океанической коры и мантийной части океанической литосферы [29, 30, 28].

В шестом слое (рис. 7 б), при значительной толщине (230–550 км), суммарная энергия меньше, чем в пятом слое (см. таблицу), почти отсутствуют землетрясения выше класса 14 ($k \approx 4$), однако количество событий больше.

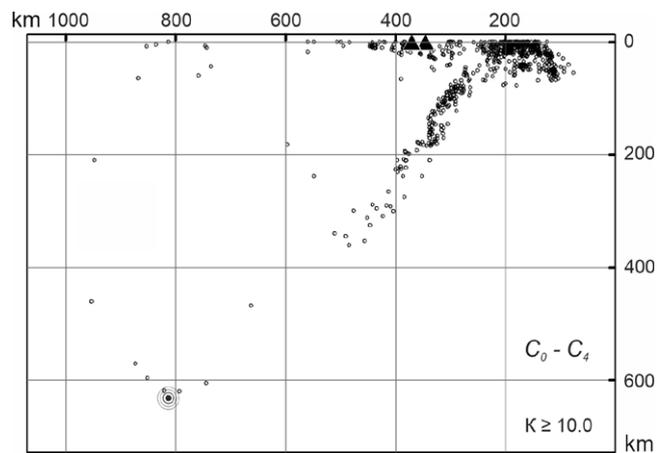


Рис. 6. Проекция гипоцентров землетрясений полигона $C_0-C_4-C_6-C_5$ на вертикальную плоскость по профилю C_0-C_4 . Позиция гипоцентра Охотоморского землетрясения с $M = 8.3$ отмечена окружностями с точкой в центре. Треугольниками обозначены вулканы Толбачик и Ключевской.

Fig. 6. Projection of earthquake hypocenters of the $C_0-C_4-C_6-C_5$ test site onto the vertical plane along the C_0-C_4 profile. Circles with a dot indicate the position of the hypocenter of the Sea of Okhotsk earthquake with $M = 8.3$. The Tolbachik and Klyuchevskoy volcanoes are marked with triangles.

Поскольку мантия на глубинах пятого и шестого слоев обладает пониженной вязкостью [27], контакт плита–мантия носит пластический характер, что обуславливает слабую сейсмичность на этих глубинах.

Глубже 550 км (седьмой слой) характеристики сейсмичности значительно меняются, прежде всего за счет Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. с $M = 8.3$. При относительно небольшом числе событий наблюдается огромный рост суммарной энергии (см. таблицу), отношение k возрастает до 830. То есть это слой редких сильных землетрясений. На карте (рис. 8) можно отметить выстраивание землетрясений вдоль границ крупных блоков.

На рис. 9 кривые накопления нормированной кумулятивной сейсмической энергии землетрясений для Камчатского региона и для участка сейсмофокальной зоны $B_0-A_0-A_1-A_2-A_3-B_2$ (рис. 1 а) демонстрируют возрастание сейсмической активности с начала 2000-х годов до времени Охотоморского землетрясения.

На рис. 10 b, d представлены карты распределения землетрясений Камчатского региона с 01.01.2000 до 23.05.2013 (4892 дня до Охотоморского землетрясения) и на рис. 10 а, с – для интервала такой же длительности 10.08.1986 – 31.12.1999 (второй и третий слои СФ зоны).

Для периода 01.01.2000 – 23.05.2013 в пределах второго и третьего слоев наблюдается рост количества событий по сравнению с периодом 10.08.1986 – 31.12.1999. На рис. 10 b видно, что землетрясения на внешнем склоне желоба напротив Кроноцкого и Камчатского заливов выстраиваются по дугообразным линиям, сходящимся к центру Камчатского залива. Немного восточнее северного блока подводного хребта Шатского (рис. 1 а) выделяется компактное сгущение землетрясений в Авачинском заливе (рис. 10 b). Перед Охотоморским землетрясением здесь произошло уникальное по масштабам событие – крупный рой землетрясений. За неделю до Охотоморского землетрясения в области роя было зарегистри-

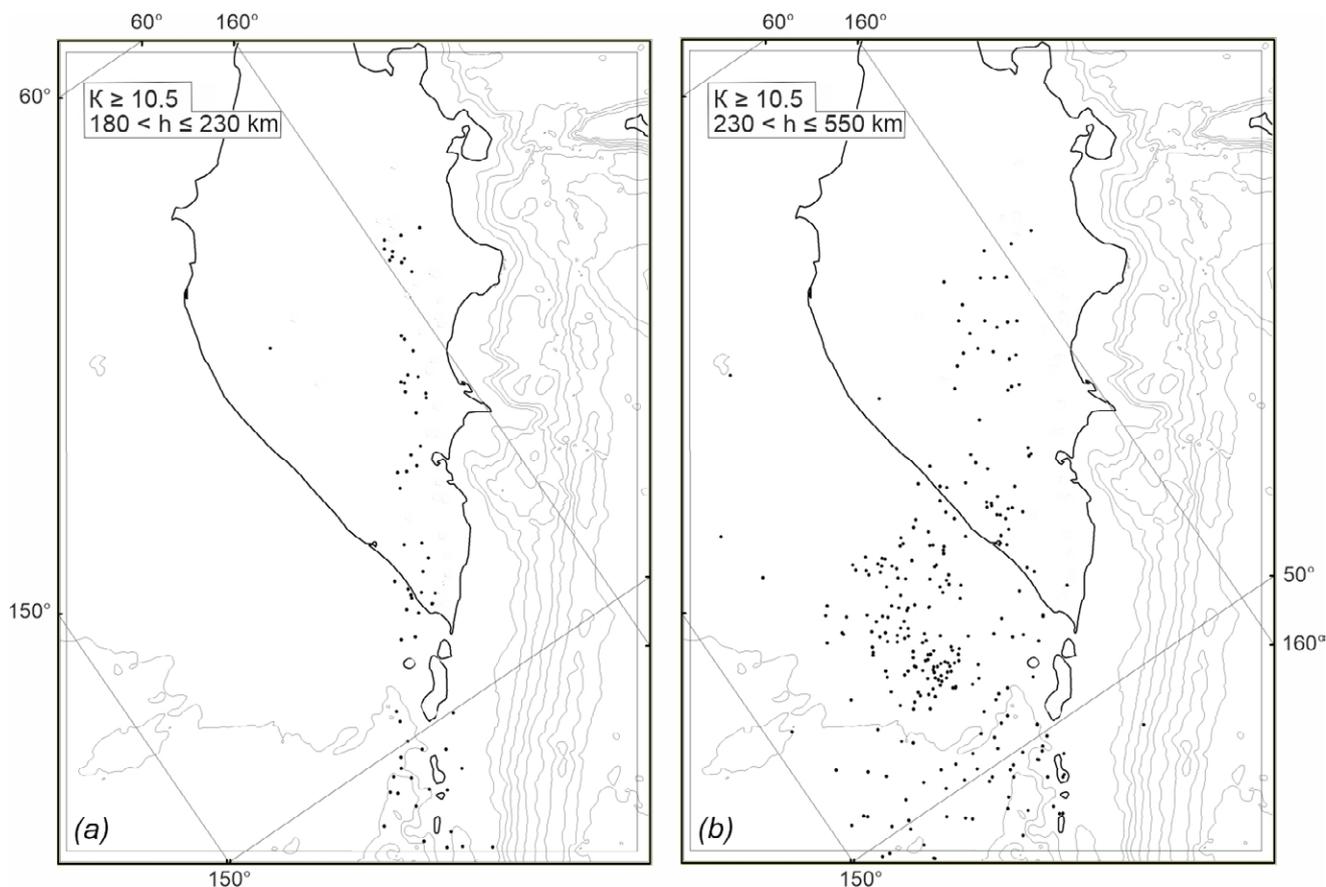


Рис. 7. Эпицентры землетрясений для пятого (а) и шестого (b) фокальных слоев.

Fig. 7. Earthquake epicenters for the fifth (a) and sixth (b) focal layers.

ровано несколько сот событий, из которых около 30 землетрясений класса 12–14. Результаты модельных экспериментов и натуральных наблюдений влияния вибраций на развитие разрыва [31, 32] показали, что слабое внешнее воздействие создает условия нелинейного соотношения между напряжениями и деформациями, в силу чего даже низкоамплитудные воздействия могут служить триггером к возникновению смещений берегов энергонасыщенных разломов, находящихся под напряжением. Не исключено, что интенсивная роевая активность в верхней части слэба непосредственно перед Охотоморским землетрясением могла быть триггером глубокого землетрясения в том же сегменте.

Значительный рост суммарной энергии глубже 550 км обеспечен прежде всего за счет Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. Для объяснения причины глубоких землетря-

сений предложено несколько гипотез: сдвиговая неустойчивость; расщепление погружающейся океанической плиты (кора движется по границе верхняя – нижняя мантия, а ее нижняя, литосферная часть опускается в нижнюю мантию); уменьшение объема, вызванное фазовым переходом [33, 34].

На основе представленных в статье данных попытаемся обосновать гипотезу возможного

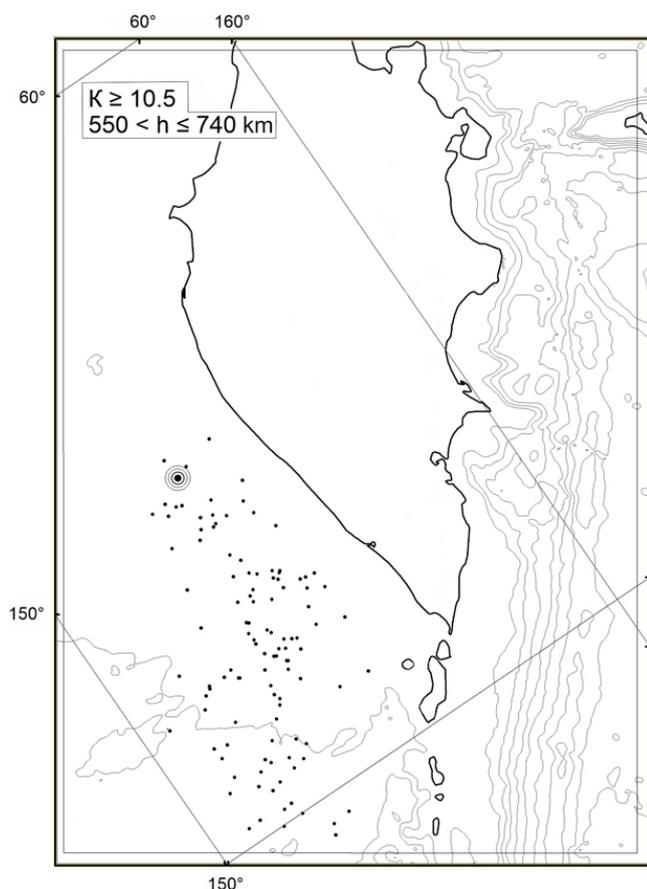


Рис. 8. Эпицентры землетрясений для седьмого фокального слоя. Землетрясение с $M = 8.3$ отмечено окружностями с точкой.
Fig. 8. Earthquake epicenters for the seventh focal layer. The earthquake with $M = 8.3$ is marked by the circles with dot.

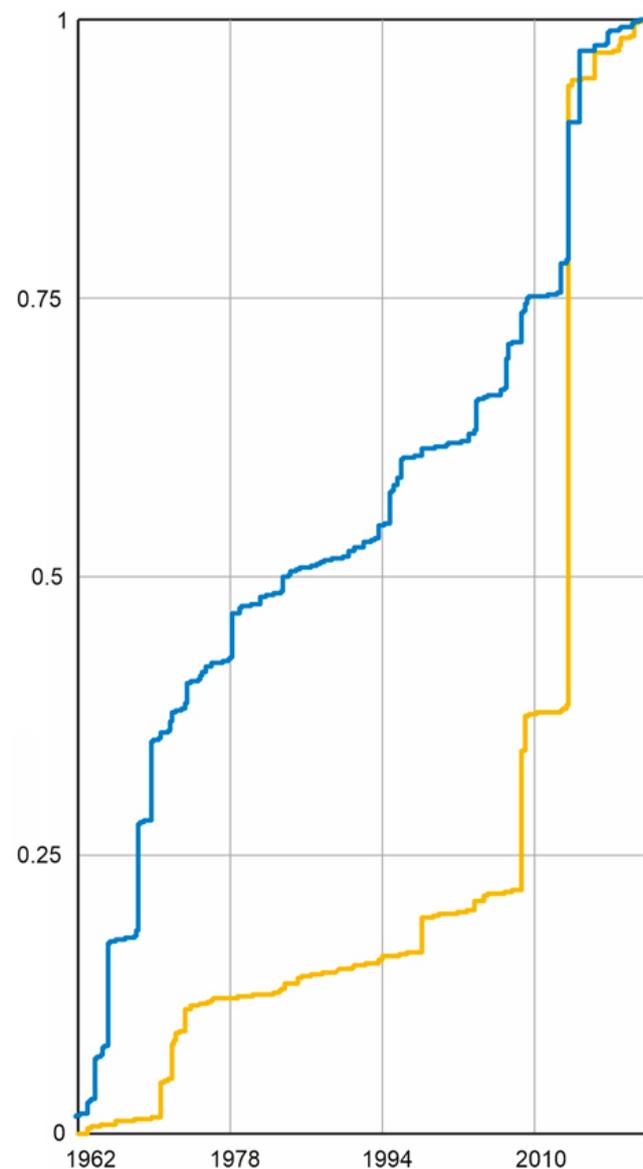


Рис. 9. Кривые накопления нормированной кумулятивной сейсмической энергии землетрясений для показанного на карте (рис. 1 а) участка $B_0-A_0-A_1-A_2-A_3-B_2-B_3$ (синяя линия, 34 670 событий класса $K \geq 10$) и для Камчатского региона (желтая линия, 14 465 событий $K \geq 10$).

Fig. 9. Curves of accumulation of normalized cumulative seismic energy of earthquakes for the section $B_0-A_0-A_1-A_2-A_3-B_2-B_3$ shown on the map (Fig. 1a) (blue line; 34,670 events of class $K \geq 10$) and for the Kamchatka region (yellow line; 14,465 events of $K \geq 10$).

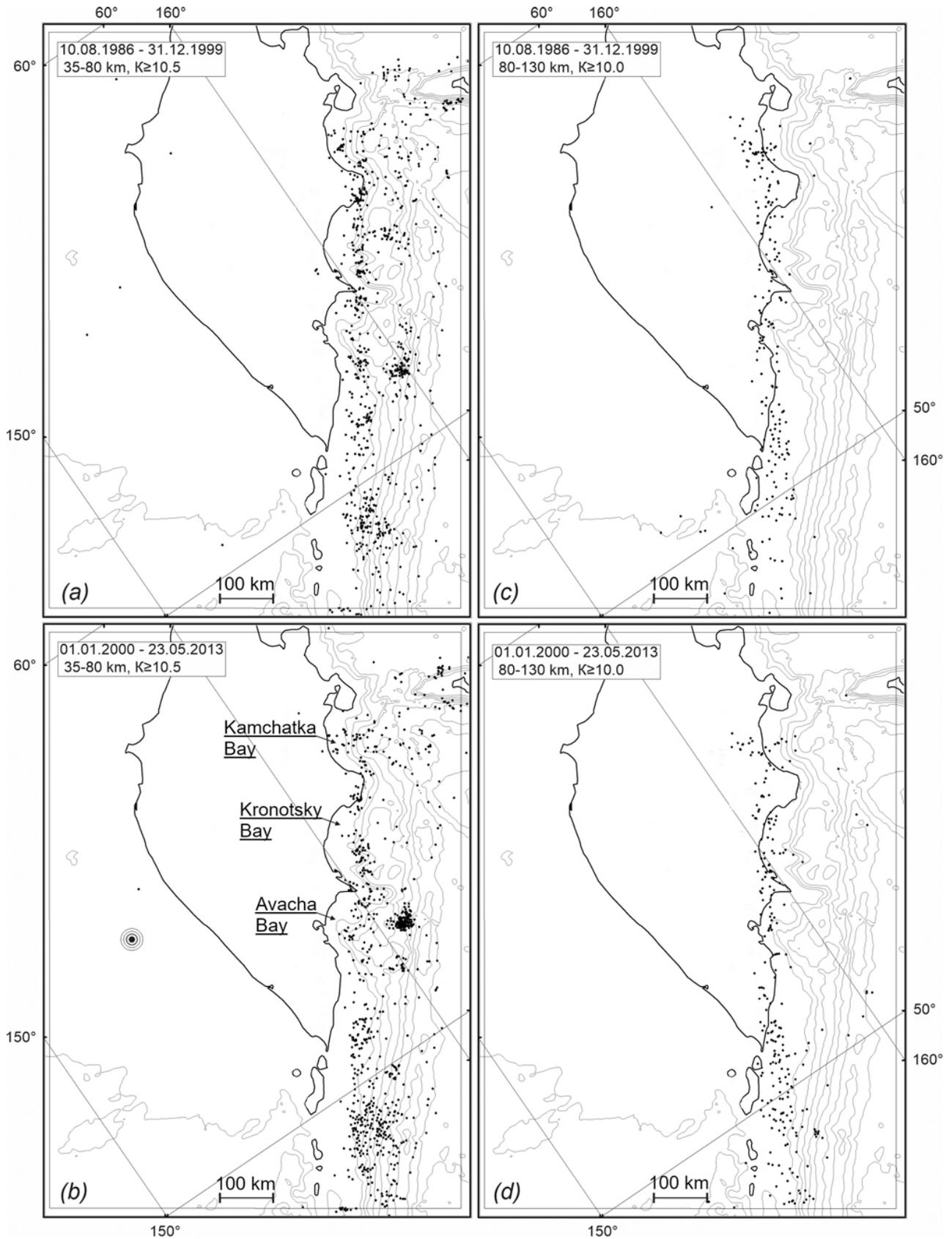


Рис. 10. Эпицентры землетрясений для глубин 35–80 км (а, б), 80–130 км (с, д) за временные интервалы 10.08.1986 – 31.12.1999 (а, с) и 01.01.2000 – 23.05.2013 (б, д).

Fig. 10. Epicenters of earthquakes for depths of 35–80 km (a, b), 80–130 km (c, d) for the time intervals of 10.08.1986 – 31.12.1999 (a, c) and 01.01.2000 – 23.05.2013 (b, d).

влияния на глубинную сейсмичность Курило-Камчатского региона астеносферного течения из-под окраины Азии [35, 36].

В пределах континентов мощность литосферы может достигать 300–400 км [19]. Ниже континентальную литосферу подстилает слой частично расплавленной мантии пониженной вязкости [28, 37]. Глубокое астеносферное течение из-под Евразийской литосферной плиты напирает на нижнюю часть погрузившегося слэба. Давление со стороны мантийного потока на плиту вызывает сильные глубокие землетрясения, например Охотоморское 24.05.2013 г. На рис. 1 б полоса гипоцентров землетрясений, поднимающаяся от нижнего края северной границы плиты, где произошло землетрясение с $M = 8.3$, маркирует зону наиболее сильных деформаций под давлением мантийного потока на слэб. Такое распределение гипоцентров предполагает, что в горизонтальной проекции мантийный поток встречается с плитой под острым углом. Мантийный поток, поднимаясь по наклонной плоскости океанической плиты, перемещается на ЮЗ вдоль слэба. Подъем потока к поверхности приводит к трансформации вещества континентальной литосферы. Проведенные в Охотском море структурные исследования методом глубинного сейсмического зондирования показали сокращение мощности коры под Курильской впадиной до 10 км [38]. Подъем горячего мантийного течения к поверхности и разогрев литосферы объясняет образование в районе Южно-Охотской глубоководной впадины сравнительно тонкой коры, близкой к океаническому типу с аномально высоким значением теплового потока [18, 23]. Во фронтальной части Центральных Курил выявлена структура растяжения [39], а в прол. Буссоль видна вертикальная асейсмическая область (рис. 1 б). Возможной причиной растяжения является движение мантийного потока вдоль СФ зоны.

Образование восточнее п-ова Камчатский Командорской котловины, как и Курильской, также можно связать с подъемом к поверхности мантийного течения из-под Евразийской литосферной плиты. Наклонным слэбом в

этом случае может быть погребенная под Северо-Американской плитой океаническая плита Кула [35, 40, 41]. Обнаруженные к северу от Алеутской дуги высокоскоростные аномалии интерпретированы [42] как остатки субдукционного комплекса. В геотермическом отношении для Командорской котловины также характерны высокие значения теплового потока [23].

Заключение

В данной работе исследованы особенности морфологии сейсмофокальной зоны Камчатского региона на основе инструментальных наблюдений с 1962 по 2021 г. В соответствии с пиковыми значениями распределения сейсмической энергии по глубине выделено семь фокальных слоев с глубинами 0–35, 35–80, 80–130, 130–180, 180–230, 230–550, 550–700 км. Более 85 % землетрясений с $K \geq 10$ происходит на глубинах до 80 км. Максимумы суммарной энергии приходятся на глубины $0 < h < 80$ км и $550 < h < 700$ км. Отношение $\sum E(K \geq 14) / \sum E(10 \leq K < 14)$ максимально для слоя $h > 550$ км.

Для каждого из выделенных слоев построены карты распределения эпицентров землетрясений. Количество землетрясений в слое $h < 35$ км на внешнем склоне желоба к ЮЗ от Авачинского залива несколько больше, чем к СВ. На основании этого можно предположить, что сегменты фронтального выступа на юге Авачинского залива разделяет крупный поперечный разлом континентальной литосферы СЗ простирания.

Группирование землетрясений на внутреннем склоне желоба вкост береговой линии, иногда в форме изогнутых полос, маркирует разломы между блоками выступающих частей континентальной коры. Область предполагаемого очага землетрясения 04.11.1952 с магнитудой 8.5 и крупный блок фронтального выступа между о. Парамушир и Авачинским заливом приблизительно совпадают. Поперечные разломы севернее п-ова Шипунский развернуты в субширотном направлении и разделяют блоки значительно меньшего размера

(Курило-Камчатская островодужная структура простирается в СВ направлении). Возможно, разворот разломов вызван изменением направления погружения сегмента субдуцирующей плиты и появлением к северу от Авачинского залива ЮЗ компоненты смещения вдоль желоба. В этом случае подводные горы и хребты на этом участке континентального склона Камчатки могут быть складками при деформации фронтального выступа.

Землетрясения в слое 35–80 км, происходящие в океанической коре и подошве выступа континентальной коры, связаны с жестким взаимодействием слэба с мантийной частью континентальной литосферы, вызывающим крутой изгиб океанической плиты. При этом высокая сейсмическая активность прекращается западнее хорошо выделяемой границы вдоль нависающего выступа континентальной коры. Можно допустить, что к СЗ от этой границы на глубинах 35–80 км начинается сравнительно однородная и прочная мантийная часть континентальной литосферы.

На глубинах 80–130 км количество событий и суммарная энергия снижаются, однако растет доля сильных событий. Землетрясения на этих глубинах распределены без сгущений в узкой полосе вдоль СФ зоны, исключая линейный элемент в Камчатском заливе, маркирующий разлом, пересекающий литосферу океанической плиты. Вулканы Ключевской группы и вулкан Толбачик попадают на продолжение этого разлома. Проекция на вертикальную плоскость гипоцентров землетрясений участка СФ зоны, включающего северную группу вулканов, образует вертикальный излом под вулканами Толбачик и Ключевской на глубинах 140–180 км. Возможно, здесь по краю слэба образовалась трещина, открывающая доступ вещества астеносферы из-под океанической плиты.

Полоса землетрясений для глубин 130–180 км перекрывает вулканический пояс, что можно объяснить присутствием на этом уровне зоны плавления пород океанической коры и мантийного клина с образованием первичной магмы.

На глубине 230–550 км происходит сравнительно немного событий и почти отсутству-

ют землетрясения $K \geq 14$. Слабая сейсмичность на этих глубинах обусловлена пониженной вязкостью мантии на этом интервале глубин, вследствие которой контакт плита–мантия носит пластический характер.

Глубже 550 км характеристики сейсмичности значительно меняются. Мощные землетрясения происходят на границе верхняя – нижняя мантия. Огромный рост суммарной энергии здесь обеспечен прежде всего за счет Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г.

Для объяснения представленных в статье данных предложена гипотеза влияния на глубинную сейсмичность Курило-Камчатского региона астеносферного течения из-под окраины Азии.

Список литературы

1. Гордеев Е.И., Федотов С.А., Чебров В.Н. **2013**. Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961–2011 гг.: основные результаты. *Вулканология и сейсмология*, 1: 3–18.
2. Федотов С.А., Кузин И.П., Бобков М.Ф. **1964**. Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961–1962 гг. *Изв. АН СССР. Сер. геофизическая*, 9: 1360–1375.
3. Кузин И.П. **1974**. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. М.: Наука, 132 с.
4. Федотов С.А., Гусев А.А., Шумилина Л.С., Чернышова Г.В. **1985**. Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов в ней, связь с вулканизмом). *Вулканология и сейсмология*, 4: 91–107.
5. Федотов С.А., Шумилина Л.С., Чернышова Г.В. **1987**. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных исследований. *Вулканология и сейсмология*, 6: 29–61.
6. Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И., Леонов В.Л., Чебров В.Н. **2006**. Мелкофокусные землетрясения п-ова Камчатка. *Вулканология и сейсмология*, 3: 28–38. EDN: HTUGUR
7. Селиверстов Н.И. **2007**. Структура сейсмофокальной зоны Камчатки. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(9): 10–26. EDN: IAGJFB
8. Kanamori H., Anderson D.L. **1975**. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. of the Seismological Society of America*, 65: 1073–1095.
9. Allmann B.P., Shearer P.M. **2009**. Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 114, B01310. <https://doi.org/10.1029/2008jb005821>

10. Venkataraman A., Kanamori H.A. **2004.** Observational constraints on the fracture energy of subduction zone earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 109, B05302. <https://doi.org/10.1029/2003jb002549>
11. Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. **1995.** Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophysical Journal International*, 122(1): 108–124. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1995.tb03540.x>
12. Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. **2013.** Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. *Вулканология и сейсмология*, 1: 18–40. doi: 10.7868/S0203030613010021; EDN: PUASZB
13. Чеброва А.Ю., Чемарев Е.А., Матвеев Е.А., Чебров Д.В. **2020.** Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции. *Геофизические исследования*, 21(3): 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>; EDN: QQHRZU
14. Bondár I., Storchak D.A. **2011.** Improved location procedures at the International Seismological Centre. *Geophysical J. International*, 186: 1220–1244. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2011.05107.x>
15. Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. **1981.** Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4): 2825–2852. <https://doi.org/10.1029/jb086ib04p02825>
16. Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. **2012.** The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
17. Федотов С.А. **1972.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 116 с.
18. Сергеев К.Ф. **1976.** Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука, 239 с.
19. Балакина Л.М. **1983.** Землетрясения Тихого океана (пространственное расположение и процессы в очагах). *Геотектоника*, 5: 20–51.
20. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин И.Е. **2004.** Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 610 с.
21. Лобковский Л.И., Владимирова И.С., Габсатаров И.С., Гарагаш И.А., Баранов Б.В., Стеблов Г.М. **2017.** Постсейсмические движения после Симуширских землетрясений 2006–2007 гг. на различных стадиях сейсмического цикла. *Доклады Академии наук*, 473(3): 359–364.
22. Лобковский Л.И., Владимирова И.С., Алексеев Д.А., Габсатаров Ю.В. **2021.** Двухзвенная клавишно-блоковая модель генерации сильнейших субдукционных землетрясений. *Доклады Академии наук*, 496(1): 78–81.
23. Селиверстов Н.И. **2009.** Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 191 с.
24. Лобковский Л.И. **1988.** Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 251 с.
25. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. **1993.** Природа тектонической активности земли. М.: ВИНТИ, 291 с. (Итоги науки и техники, Физика земли).
26. Hess H.H. **1962.** History of the ocean basins. In: *Petrological Studies: A volume in honor of A.F. Buddington*. New York: Geological Society of America, p. 599–620. <https://doi.org/10.1130/petrologic.1962.599>
27. Добрецов Н.Л., Кидряшкин А.Г., Кидряшкин А.А. **2001.** Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 408 с.
28. Жарков В.Н. **2012.** Физика земных недр. М.: Наука и образование, 384 с.
29. Brudzinski M.R., Thurber C.H., Hacker B.R., Engdahl R. **2007.** Global prevalence of double Benioff zones. *Science*, 316(5830): 1472–1474. <https://doi.org/10.1126/science.1139204>
30. Hacker G.R., Peacock S.M., Aubers G.A., Holloway S.D. **2003.** Subduction factory 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B1): 2030–2046. <https://doi.org/10.1029/2001jb001129>
31. Адушкин В.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Виноградов В.А., Гончаров А.И., Куликов В.И., Кулюкин А.А. **2009.** О влиянии сейсмических колебаний на развитие тектонических деформаций. *Доклады Академии наук*, 426(1): 98–100. EDN: KAVSSR
32. Кочарян Г.Г., Федоров А.Е. **1990.** Об особенностях механики сейсмического процесса в блочной геофизической среде. *Доклады Академии наук*, 315(6): 1345–1349.
33. Лыскова Е.Л. **2014.** Глубокофокусные землетрясения. В сб.: *Вопросы геофизики*, 47. СПб., с. 62–74. (Ученые записки СПбГУ; 447).
34. Диденко А.Н., Кузьмин М.И. **2018.** Глубокофокусные землетрясения: пространственное распределение, возможные причины и геодинамические следствия. *Геодинамика и тектонофизика*, 9(3): 947–965. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0378947>
35. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. **1979.** Палеогеодинамика. М.: Недра, 311 с.
36. Nelson T.H., Temple P.G. **1972.** Mainstream mantle convection: a geological analysis of plate motion.

- Bull. of the American Association of Petroleum Geologists (AAPG Bulletin)*, 56(2): 226–246. <https://doi.org/10.1306/819a3e54-16c5-11d7-8645000102c1865d>
37. Ito E., Sato H. **1991**. Aseismicity in the lower mantle by superplasticity of the descending slab. *Nature*, 351: 140–141. <https://doi.org/10.1038/351140a0>
 38. Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Гонтовая Л.И., Павленкова Г.А. **2018**. Глубинное строение и геодинамика Охотоморского региона. *Региональная геология и металлогения*, 76: 70–82. EDN: VRWIGX
 39. Лаверов Н.П., Лаппо С.С., Лобковский Л.И., Баранов Б.В., Кулинич Р.Г., Карп Б.Я. **2006**. Центральнo-Курильская «брешь»: строение и сейсмический потенциал. *Доклады Академии наук*, 408(6): 818–821. EDN: НТХVFT
 40. Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А. **1992**. *Введение в геодинамику*. М.: Наука, 192 с.
 41. Кононов М.В. **1989**. *Тектоника плит северо-запада Тихого океана*. М.: Наука, 169 с.
 42. Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В. **2011**. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии. *Геология и геофизика*, 52(6): 830–851.
- ## References
1. Gordeev E.I., Fedotov S.A., Chebrov V.N. **2013**. Detailed seismological investigations in Kamchatka during the 1961–2011 period: Main results. *Journal of Volcanology and Seismology*, 7: 1–15. <https://doi.org/10.1134/s0742046313010041>
 2. Fedotov S.A., Kuzin I.P., Bobkov M.F. **1964**. Detailed seismological studies in Kamchatka in 1961–1962. *Izv. USSR Academy of Sciences. Ser. Geophysical*, 9: 1360–1375. (In Russ.).
 3. Kuzin I.P. **1974**. [*Focal zone and structure of the upper mantle in the eastern Kamchatka region*]. Moscow: Nauka, 132 p. [In Russ].
 4. Fedotov S.A., Gusev A.A., Shumilina L.S., Chernyshova G.V. **1985**. Seismofocal zone of Kamchatka (geometry, location of sources in it, connection with volcanism). *Volcanology and Seismology*, 4: 91–107. (In Russ).
 5. Fedotov S.A., Shumilina L.S., Chernyshova G.V. **1987**. [Seismicity of Kamchatka and the Commander Islands based on detailed studies]. *Volcanology and Seismology*, 6: 29–61. (In Russ).
 6. Gordeev E.I., Gusev A.A., Levina V.I., Leonov V.L., Chebrov V.N. **2006**. Shallow earthquakes of the Kamchatka Peninsula. *Journal of Volcanology and Seismology*, 3: 28–38. (In Russ.). EDN: HTUGUR
 7. Seliverstov N.I. **2007**. Structure of Kamchatka seismic focal zone. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, 1(9): 10–26. (In Russ.).
 8. Kanamori H., Anderson D.L. **1975**. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. of the Seismological Society of America*, 65: 1073–1095.
 9. Allmann B.P., Shearer P.M. **2009**. Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 114, B01310. <https://doi.org/10.1029/2008jb005821>
 10. Venkataraman A., Kanamori H.A. **2004**. Observational constraints on the fracture energy of subduction zone earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 109, B05302. <https://doi.org/10.1029/2003jb002549>
 11. Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. **1995**. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel-times. *Geophysical Journal International*, 122(1): 108–124. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1995.tb03540.x>
 12. Chebrov V.N., Droznin D.V., Kugaenko Yu.A., Levina V.I., Senyukov S.L., Sergeev V.A., Shevchenko Yu.V., Yashchuk V.V. **2013**. The system of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011. *Journal of Volcanology and Seismology*, 7(1): 16–36. <https://doi.org/10.1134/s0742046313010028>
 13. Chebrova A.Yu., Chemarev E.A., Matveenko E.A., Chebrov D.V. **2020**. Seismological data information system in Kamchatka Branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions. *Geofizicheskie issledovaniya*, 21(3): 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
 14. Bondár I., Storchak D.A. **2011**. Improved location procedures at the International Seismological Centre. *Geophysical J. International*, 186: 1220–1244. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2011.05107.x>
 15. Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. **1981**. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4): 2825–2852. <https://doi.org/10.1029/jb086ib04p02825>
 16. Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. **2012**. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
 17. Fedotov S.A. **1972**. *Energy classification of Kuril-Kamchatka earthquakes and the problem of magnitudes*. Moscow: Nauka, 116 p. (In Russ).
 18. Sergeev K.F. **1976**. *Tectonics of the Kuril island system*. Moscow: Nauka, 239 p. (In Russ.).
 19. Balakina L.M. **1983**. Earthquakes of the Pacific Ocean (spatial location and source processes). *Geotectonics*, 5: 20–51.
 20. Lobkovskii L.I., Nikishin A.M., Khain I.E. **2004**. *Modern problems of geotectonics and geodynamics*. Moscow: Nauchnyi mir, 610 p. (In Russ.).
 21. Lobkovskii L.I., Vladimirova I.S., Gabsatarov I.S., Garagash I.A., Baranov B.V., Steblou G.M. **2017**. Post-

- seismic motions after the 2006–2007 Simushir earthquakes at different stages of the seismic cycle. *Doklady Earth Sciences*, 473: 375–379. <https://doi.org/10.1134/s1028334x17030266>
22. Lobkovskii L.I., Vladimirova I.S., Alekseev D.A., Gabsatarov Yu.V. **2021**. Two-element keyboard model of generation of the strongest subduction earthquakes. *Doklady Earth Sciences*, 496: 72–75. <https://doi.org/10.1134/s1028334x2101013x>
 23. Seliverstov N.I. **2009**. *Geodynamics of the junction zone of the Kuril-Kamchatka and Aleutian island arcs*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Publ. House of Vitus Bering Kamchatka State University, 191 p. (In Russ.).
 24. Lobkovskii L.I. **1988**. *Geodynamics of spreading zones, subduction zones and two-tier plate tectonics*. Moscow: Nauka, 252 p. (In Russ.).
 25. Sorokhtin O.G., Ushakov S.A. **1993**. [*The nature of tectonic activity of the Earth*]. Moscow: VINITI, 291 p. (Results of science and technology. Physics of the Earth). (In Russ.).
 26. Hess H.H. **1962**. History of the ocean basins. In: *Petrological Studies: A volume in honor of A.F. Buddington*. New York: Geological Society of America, p. 599–620. <https://doi.org/10.1130/petrologic.1962.599>
 27. Dobretsov N.L., Kidryashkin A.G., Kidryashkin A.A. **2001**. *Deep geodynamics*. Novosibirsk: Publ. House of the Siberian Branch of RAS, 408 p. (In Russ.).
 28. Zharkov V.N. **2012**. *Physics of the Earth's interior*. Moscow: Nauka i obrazovanie, 384 p. (In Russ.).
 29. Brudzinski M.R., Thurber C.H., Hacker B.R., Engdahl R. **2007**. Global prevalence of double Benioff zones. *Science*, 316(5830): 1472–1474. <https://doi.org/10.1126/science.1139204>
 30. Hacker G.R., Peacock S.M., Aubers G.A., Holloway S.D. **2003**. Subduction factory 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B1): 2030–2046. <https://doi.org/10.1029/2001jb001129>
 31. Adushkin V.V., Kocharyan G.G., Pavlov D.V., Vinogradov V.A., Goncharov A.I., Kulikov V.I., Kulyukin A.A. **2009**. Influence of seismic vibrations on the development of tectonic deformations. *Doklady Earth Sciences*, 426(1): 588–590. <https://doi.org/10.1134/s1028334x09040175>
 32. Kocharyan G.G., Fedorov A.E. **1990**. On the mechanics of the seismic process in a blocky geophysical medium. *Dokl. Akademii nauk SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 315(6): 1345–1349. (In Russ.).
 33. Lyskova E.L. **2014**. Deep focus earthquakes. In: *Voprosy geofiziki*, 47. Saint Petersburg, p. 62–74. (In Russ.).
 34. Didenko A.N., Kuzmin M.I. **2018**. Deep focus earthquakes: spatial distribution, possible causes and geodynamic consequences. *Geodynamics and Tectonophysics*, 9(3): 947–965. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0378947>
 35. Zonenshain L.P., Kuzmin M.I. **1979**. *Paleogeodynamics*. Moscow: Nedra, 311 p. (In Russ.).
 36. Nelson T.H., Temple P.G. **1972**. Mainstream mantle convection: a geological analysis of plate motion. *Bull. of the American Association of Petroleum Geologists (AAPG Bulletin)*, 56(2): 226–246. <https://doi.org/10.1306/819a3e54-16c5-11d7-8645000102c1865d>
 37. Ito E., Sato H. **1991**. Aseismicity in the lower mantle by superplasticity of the descending slab. *Nature*, 351: 140–141. <https://doi.org/10.1038/351140a0>
 38. Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Gontovaya L.I., Pavlenkova G.A. **2018**. Deep structure and geodynamics of the Sea of Okhotsk region. *Regional Geology and Metallogeny*, 76: 70–82. (In Russ.).
 39. Laverov N.P., Lappo S.S., Lobkovsky L.I., Baranov B.V., Kulinich R.G., Karp B.Ya. **2006**. The Central Kuril “gap”: structure and seismic potential. *Doklady Earth Sciences*, 409(5): 787–790.
 40. Zonenshain L.P., Savostin L.A. **1992**. *Introduction to geodynamics*. Moscow: Nauka, 192 p. (In Russ.).
 41. Kononov M.V. **1989**. [*Plate tectonics of the Northwest Pacific*]. Moscow: Nauka, 169 p. (In Russ.).
 42. Kulakov I.Yu., Dobretsov N.L., Bushenkova N.A., Yakovlev A.V. **2011**. Slab shape in subduction zones beneath the Kurile-Kamchatka and Aleutian arcs based on regional tomography results. *Russian Geology and Geophysics*, 52(6): 830–851.

Об авторе

Шевченко Юрий Валентинович (<https://orcid.org/0009-0005-5992-9724>), начальник сектора метрологии, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), Петропавловск Камчатский, Россия, klb@emsd.ru

Поступила 21.11.2024

Принята к публикации 12.02.2025

About the Author

Shevchenko, Yury V. (<https://orcid.org/0009-0005-5992-9724>), Head of the metrology sector, the Kamchatka Branch of the Federal Research Center “Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences” (KB FRC GS RAS), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, klb@emsd.ru

Received 21 November 2024

Accepted 12 February 2025

© Автор, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.34(571.642)

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.1.022-036>
<https://www.elibrary.ru/wqiuqw>

Новые переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Сахалинского региона

Д. А. Сафонов

E-mail: d.safonov@imgg.ru

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

Резюме. В связи с методическими изменениями в работе Сахалинского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) возникла необходимость в уточнении переходных соотношений между энергетическими характеристиками землетрясений Сахалинского региона, используемых для магнитудной унификации каталога. Для получения переходных соотношений использована выборка за период с 2017 по октябрь 2024 г. из базы данных регионального информационно-обрабатывающего центра «Южно-Сахалинск», входящего в структуру СФ ФИЦ ЕГС РАН. Методом обобщенной ортогональной регрессии рассчитаны соотношения, связывающие магнитуду коровых ($h < 40$ км) землетрясений M_L и энергетические классы K_p и K_c , а также M_L и M_{PVA} отдельно для коровых и для глубокофокусных ($h = 250–600$ км) землетрясений региона. Также получено соотношение между M_L и магнитудой Японского метеорологического агентства M_j . Показано, что для неглубоких землетрясений Сахалина $M_j \approx M_L$, для глубокофокусных отмечена недооценка величины M_L относительно M_j . В дальнейшем по мере накопления данных предполагается уточнение полученных зависимостей.

Ключевые слова: землетрясение, магнитудные шкалы, регрессионные соотношения, Сахалинский регион

New transition relationships for the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region

Dmitry A. Safonov

E-mail: d.safonov@imgg.ru

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

Abstract. Due to methodological changes in the work of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center “Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences” (SB FRC GS RAS), it became necessary to clarify the transition relationships between the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region used for the magnitude unification of the catalog. To obtain the transition relationships, a sample for the period from 2017 to October 2024 was used from the database of the “Yuzhno-Sakhalinsk” regional information processing center, which is a part of the SB FRC GS RAS. Using the generalized orthogonal regression method, the relationships linking the magnitude of crustal ($h < 40$ km) earthquakes M_L and the energy classes K_p and K_c were calculated, as well as the magnitudes M_L and M_{PVA} separately for crustal and deep-focus ($h = 250–600$ km) earthquakes in the region. The relationship between M_L and the magnitude of the Japan Meteorological Agency M_j was also obtained. It was revealed that for shallow Sakhalin earthquakes $M_j \approx M_L$; for deep-focus earthquakes, an underestimation of the magnitude M_L relative to M_j was noted. As the observational data accumulates, it is assumed that the obtained relationships will be refined.

Keywords: earthquake, magnitude scales, regression relationships, Sakhalin region

Для цитирования: Сафонов Д.А. Новые переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Сахалинского региона. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 1, с. 22–36. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.1.022-036>; <https://www.elibrary.ru/wqiuqw>

For citation: Safonov D.A. New transition relationships for the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 1, pp. 22–36. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.1.022-036>; <https://www.elibrary.ru/wqiuqw>

Финансирование и благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ ГР 124013000764-8) с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS (№ SR 124013000764-8) using the data obtained from a unique research facility “Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolithozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Введение

С 2024 г. Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) при обработке сейсмических записей для подготовки окончательного каталога сейсмических событий перешел на программное обеспечение DIMAS (Display, Interactive Manipulation and Analysis of Seismograms) [1], ранее использовавшееся в региональном информационно-обрабатывающем центре (РИОЦ) «Южно-Сахалинск» для составления оперативного каталога.

С 2006 г. в рамках федеральной целевой программы «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 г.» [2] Геофизической службой РАН внедрялась сейсмическая подсистема Службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. Созданы региональные информационно-обрабатывающие центры «Петропавловск», «Южно-Сахалинск», «Владивосток». РИОЦ «Южно-Сахалинск», как и остальные региональные центры, с 2011 г. использует ПО DIMAS в обработке цифровых записей с серверов сбора и хранения телеметрических данных для получения параметров землетрясений в Дальневосточном регионе и по всему миру. Результатом такой обработки является оперативный каталог землетрясений, который дает представление о текущей сейсмичности в регионе и на сопредельных территориях.

Ранее для составления окончательного каталога отделом сводной обработки сейсмо-

логических данных (ОСОСД) Сахалинского филиала использовался программный комплекс MGP [3], разработанный около трех десятилетий назад, в конце эпохи аналоговых сейсмологических наблюдений и бумажных сейсмограмм.

В основных характеристиках землетрясений, получаемых с использованием MGP и DIMAS, есть некоторые различия. В частности, это касается энергетических параметров землетрясений. Как и ранее, измерение пиковых значений скоростей основных групп волн для определения магнитуд проводится после эмуляции цифровых записей к характеристикам аналоговых приборов для использования магнитудных шкал, разработанных в 1960–1980-х годах. Несмотря на то что методики снятия замеров амплитуд и периодов колебаний в РИОЦ «Южно-Сахалинск» и ОСОСД в целом одинаковы, результаты определения основных энергетических характеристик землетрясений с использованием MGP и DIMAS, как отмечалось в [4], значительно расходятся.

Кроме того, изменился и перечень определяемых энергетических характеристик землетрясений. Так, ОСОСД определял две магнитуды по поверхностной волне (M_{LV} и M_{LH}), пять магнитуд по объемной волне (M_{PV} , M_{PH} , M_{PVA} , M_{SH} , M_{SHA}) и два энергетических класса (K_p , K_c) (см. табл. 1 в [4]), при этом не все из определяемых величин попадали в итоговый каталог. Основными энергетическими характеристиками землетрясений в данных РИОЦ «Южно-Сахалинск» на сегодняшний день являются энергетические классы С.Л. Соловьева и О.Н. Соловьевой K_c [5] и Т.Г. Раутиан K_p [6], магнитуда по поверхностной волне M_s ,

по объемной волне M_{PVA} (M_{PSP}) и M_{PV} (M_{PLP}) [7], а также магнитуда Ч.Ф. Рихтера M_L по объемной волне S [8], исследованию возможностей использования которой в дальневосточной части РФ посвящена статья [4]. Такой подбор энергетических характеристик охватывает весь частотный диапазон записей и величину землетрясений от слабых и умеренных до сильных.

Наиболее распространенной энергетической характеристикой землетрясений в каталоге РИОЦ является магнитуда M_L , определяемая для большинства региональных землетрясений независимо от их величины и глубины гипоцентра. В работе [4] представлены корреляционные соотношения M_L и других энергетических характеристик, принятых в рутинной обработке землетрясений в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН, выполненные по данным каталога РИОЦ за 2017–2021 гг. В окончательных каталогах СФ ФИЦ ЕГС РАН значения данной магнитуды до настоящего момента не публиковались, хотя, ввиду массовости ее определения и доступности для всего диапазона глубин и региональных расстояний, они могут быть использованы в качестве базовой энергетической характеристики каталога.

Другой массово определяемой энергетической характеристикой землетрясений с длительным периодом использования в различных регионах Северной Евразии, включая Сахалинский, является энергетический класс Т.Г. Раутиан K_p [6]. Разработанный для сейсмически активных регионов Средней Азии, он получил широкое распространение на территории СССР и по-прежнему является основой многих каталогов континентальной части России. В пределах зоны ответственности за регистрацию землетрясений СФ ФИЦ ЕГС РАН K_p определяется в пределах Приамурья и Приморья и Сахалинского региона.

Энергетический класс Соловьева K_C первоначально разработан для неглубоких (40 ± 30 км) курильских землетрясений. Вопрос о применимости номограммы для определения класса коровых сахалинских землетрясений не был подробно изучен. Тем не менее, эта энергетическая характеристика длительное время определяется для сахалинских событий, довольно массовая и устойчивая.

Все энергетические характеристики землетрясений публикуемых каталогов филиалов ФИЦ ЕГС РАН должны сводиться к унифицированной расчетной магнитуде, обычно в каталогах ГС РАН соответствующей магнитуде по поверхностной волне M_S (M_{LH}) или моментной магнитуде M_W [9]. Хотя ранее мы получили часть переходных соотношений между M_L Рихтера и региональными магнитудами каталога [4], это сделано на относительно небольшом объеме данных, к тому же без разделения на регионы. А как показывает сравнение, в Приамурье и Приморье, Сахалинском и Курило-Охотском регионах соотношения между магнитудами могут серьезно различаться. Поэтому желательно получить отдельные межмагнитудные соотношения для регионов зоны ответственности за регистрацию землетрясений Сахалинского филиала.

Цель работы – получить на основе имеющихся данных переходные соотношения между основными энергетическими характеристиками землетрясений Сахалинского региона по каталогу РИОЦ «Южно-Сахалинск» СФ ФИЦ ЕГС РАН, а также привязать их к магнитуде M_S для обеспечения преемственности каталога и возможности расчета сейсмической энергии, являющейся основным показателем сейсмичности региона.

Методика

Наиболее распространенный метод получения межмагнитудных соотношений – расчет ортогональной стандартной регрессии (OSR). Этот метод дает лучшие результаты, чем метод стандартной линейной регрессии (SLR) [10], к тому же позволяет получить соотношение, которое можно использовать в обе стороны. Однако в случае сравнения двух величин разного масштаба – магнитуды и энергетического класса землетрясения – метод OSR неприменим. В этом случае необходимо перейти к обобщенной (generalized) ортогональной регрессии (GOR), где в качестве одного из параметров поиска выступает соотношение квадратов стандартной ошибки определения сравниваемых величин

$\eta = \bar{\sigma}_y^2 / \bar{\sigma}_x^2$, где y и x – сравниваемые величины. В [10] показано, что в случае известной величины η метод GOR предпочтительнее OSR для сравнения различных магнитудных шкал, за исключением тех случаев, когда $\eta \approx 1$.

Регрессионные соотношения рассчитывались с помощью ПО Matlab. В качестве основы для вычислений использован алгоритм «deming» [11]. Методический подход применялся ранее в [4, 12]. Результат данной работы дополнительно проверен при помощи нового выполненного в Matlab алгоритма, использующего метод расчета погрешностей из [13], аналогичный показанным в [10, 14] и дающий результат расчета интервала погрешности, слегка (в третьем значащем знаке) отличный от получаемого в алгоритме «deming».

Исходные данные

Использована выборка из базы данных землетрясений РИОЦ «Южно-Сахалинск» за период наблюдений с 2017 по октябрь 2024 г. для района с координатами 45–56° с.ш., 140–146° в.д. (рис. 1). Район почти полностью совпадает с Сахалинским регионом СФ ФИЦ ЕГС РАН, за исключением небольшой территории на юго-востоке, включенной для увеличения количества глубоких землетрясений. Более ранние данные не использовались, так как до 2017 г. определение магнитуды M_L и заполнение базы велось в тестовом режиме. Всего в выборке каталога содержится 4741 землетрясение с эпицентрами в пределах выбранного района (включая 276 глубокофокусных),

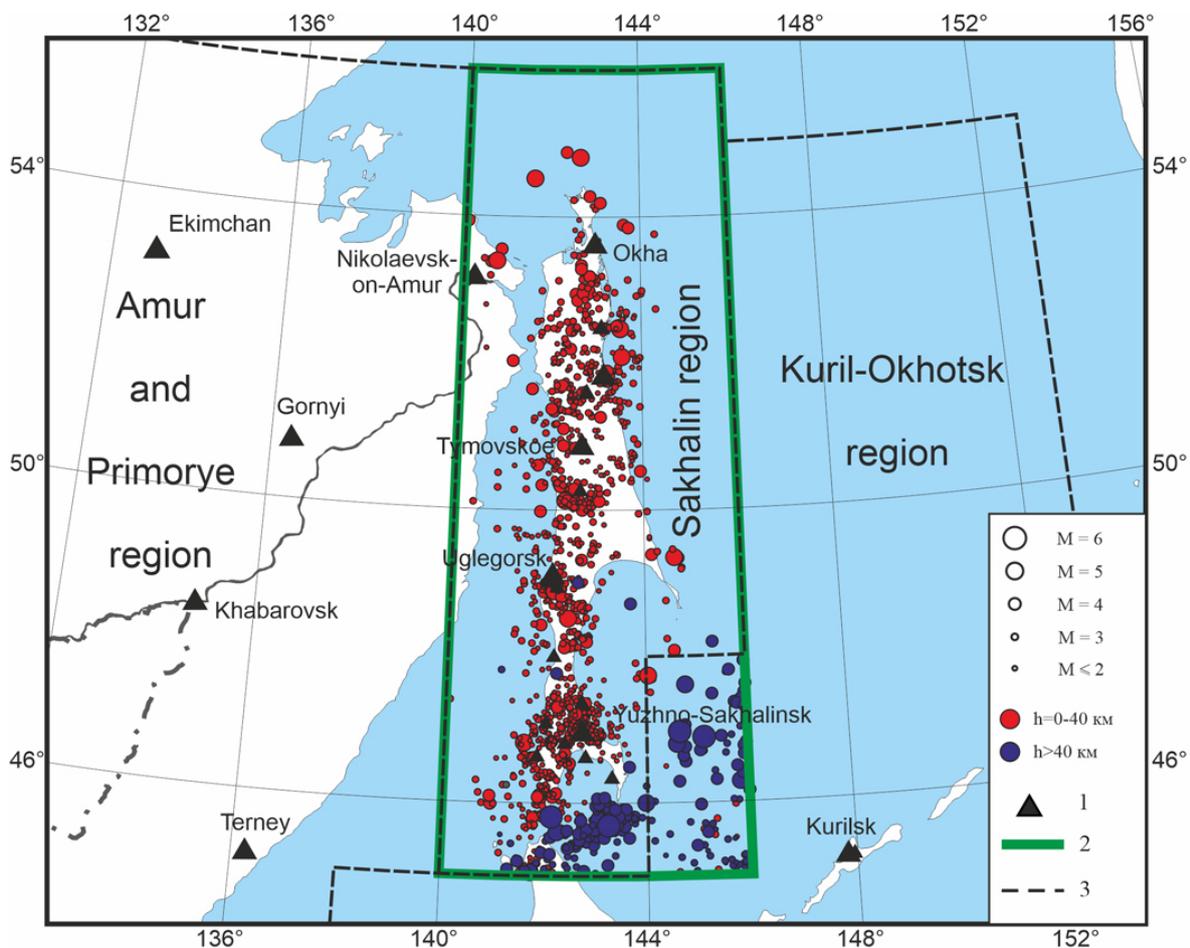


Рис. 1. Район исследования и эпицентры землетрясений по данным каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск». Показаны эпицентры землетрясений выборки с известными значениями M_L . 1 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН; 2 – границы района исследования; 3 – границы регионов СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Fig. 1. Research area and earthquake epicenters according to the catalog of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC. The earthquake epicenters of the sample with known M_L values are shown. 1 – seismic stations of SF FRC GS RAS; 2 – boundaries of the research area; 3 – boundaries of the regions of SF FRC GS RAS.

для 78 % которых определена M_L , для 70 % – K_p , для 52 % – K_c , для 17 % – M_{pva} , для 1.3 % – M_s . Магнитуда M_{pv} в данной работе не рассматривалась, ее определений очень мало. При этом для дальнейших расчетов использовались только значения магнитуд землетрясений, определенные не менее чем по двум-трем замерам на сейсмических станциях – таким образом, общее количество сравниваемых по магнитуде событий еще уменьшилось. Количество задействованных в расчете величин указано ниже в таблицах (таблицы 1 и 2).

К расчету стандартной ошибки определения энергетических характеристик привлечены данные о 60 060 станционных (выполненных под данным одной сейсмостанцией) замерах максимумов амплитуд и периодов различных фаз сейсмических волн землетрясений по базе данных РИОЦ «Южно-Сахалинск».

В качестве независимо определяемой энергетической величины для сопоставления использована магнитуда Японского метеорологического агентства JMA [15] – M_j . Привлечены значения магнитуды M_j и данные о ее определении на различных сейсмических станциях. К моменту выполнения работы на сайте Агентства доступны данные каталога и бюллетеня JMA по март 2023 г. Магнитуда M_j строится на комбинировании нескольких магнитудных шкал, отличающихся диапазоном применения и методикой, определяется либо по максимумам смещения (M_D , M_d), либо по максимальной скорости смещения (M_V , M_v) для землетрясений на локальных и региональных расстояниях, также имеется различие в диапазоне применимости в зависимости от количества используемых станций (заглавная или строчная буква в индексе). Хотя при оценке стандартной ошибки не делалось различий в конкретном подвиде M_j , в подавляющем большинстве случаев это магнитуда по скорости M_v .

Также использовались данные сейсмологического агентства NIED, Япония [16], это позволило получить значения M_j для нескольких сейсмических событий, произошедших после марта 2023 г. Всего задействовано 382 значения M_j землетрясений из упомянутой выше выборки. Для получения значений стан-

дартной магнитудной ошибки определения M_j привлечено 3579 отдельных станционных оценок из бюллетеня землетрясений JMA с эпицентрами в пределах района исследования.

Стандартная ошибка магнитудных определений

Так же как ранее в [12], на основе станционных оценок была рассчитана величина средней стандартной ошибки определения сравниваемых магнитуд и энергетических классов.

Стандартное отклонение станционной магнитудной оценки одного события рассчитывается как

$$\sigma_{ст} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M})^2}{k - 1}}, \quad (1)$$

где M_i – оценка магнитуды (энергетического класса) события по одной станции, \bar{M} – средняя магнитуда по данным k станций. Среднее стандартное отклонение станционной ошибки с учетом N событий данной магнитуды в каталоге:

$$\bar{\sigma}_{ст} = \frac{1}{N} \sum \sigma_{ст}. \quad (2)$$

Средняя стандартная ошибка магнитуды с учетом количества задействованных в ее определении станций:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{N} \sum \frac{\sigma_{ст}}{\sqrt{k}}. \quad (3)$$

Полученные значения, а также количество землетрясений N и среднее количество отдельных станционных оценок на событие k_{cp} отражены в табл. 1. Для M_L и K_C оценки хорошо согласуются с опубликованными [12] для каталога Курило-Охотского региона. Как указывалось в [12], средние значения $\bar{\sigma}$ видятся заниженными, такой учет погрешности описывает только случайную ошибку показателей магнитуды для каждого данного землетрясения, полученную при снятии замеров, но не учитывает в должной мере другие источники разброса данных, которые могут повлиять на оценки магнитуды [17]. Однако в следующих расчетах

Таблица 1. Среднее стандартное отклонение стационарной оценки ($\bar{\sigma}_{ст}$) и средняя стандартная ошибка ($\bar{\sigma}$) определения энергетических характеристик землетрясений Сахалинского региона

Table 1. The average standard deviation of the station estimates ($\bar{\sigma}_{ст}$) and the average standard error ($\bar{\sigma}$) of determining the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region

Показатель	$M_L(c)$	$M_L(d)$	K_p	$K_C(k3)$	$M_{PVA}(k3)$	$M_{PVA}(d)$	$M_j(c)$	$M_j(d)$
N	1800	168	1360	948	209	179	92	88
$k_{ср}$	3.52	2.95	3.21	4.74	4.30	5.16	7.10	8.27
$\bar{\sigma}_{ст}$	0.324	0.240	0.622	0.568	0.446	0.295	0.257	0.294
$\bar{\sigma}$	0.180	0.142	0.362	0.334	0.226	0.135	0.116	0.119

потребуется не непосредственно эти значения, а только их соотношение, потому можно использовать эти величины в расчете на то, что это не окажет большого влияния на результат.

Магнитуда M_L Ч.Ф. Рихтера [8] разработана для неглубоких землетрясений южной Калифорнии. Как показано в [4], ее применение в Курило-Охотском и Сахалинском регионах дает устойчивые значения магнитуды землетрясений в широком диапазоне глубин и расстояний. Наиболее спорным решением, по мнению автора настоящей статьи, является определение этой магнитуды для глубокофокусных событий, поскольку в оригинальной формуле используется эпицентральное, а не гипоцентральное расстояние. Чтобы избежать существенного занижения оценок магнитуды таких землетрясений, в статье [4] дана рекомендация не использовать определения этой магнитуды на сейсмостанциях, эпицентральное расстояние до которых меньше глубины гипоцентра $\Delta < h$. Поэтому для данной работы значения магнитуды M_L каталога, включающего данные с 2017 г., были пересчитаны с учетом принятой методической поправки в расчете на то, что в дальнейшем формулы будут использоваться для данных, полученных с учетом указанного ограничения. На величины M_L коровых событий удаление стационарных оценок, не отвечающих условию $\Delta < h$, практически не повлияло, тогда как число магнитудных оценок M_L для глубокофокусных событий в выборке сократилось очень существенно (с 229 до 168). Однако это также позволило уменьшить среднюю стандартную ошибку определения магнитуды глубокофокусных землетрясений в пределах региона с $\bar{\sigma} = 0.394$ до $= 0.240$.

Магнитуда M_{PVA} и класс Соловьева K_C , несмотря на массовое определение, выделяются довольно большим количеством отдельных стационарных определений, сильно отличающихся от средней величины. В [12] для уменьшения влияния таких случаев в расчетах использовались только те землетрясения, M_{PVA} которых определена по данным как минимум пяти сейсмостанций. В случае относительно небольшого каталога исследуемого района такое существенное урезание количества значений M_{PVA} и K_C нежелательно, поэтому использованы оценки этих величин для коровых событий по данным как минимум трех сейсмостанций (k3). В табл. 1 приведены значения $\bar{\sigma}$ для $M_{PVA}(k3)$ и $K_C(k3)$, рассчитанные в соответствии с этим условием. Как видно из таблицы, значения стационарной и средней стандартной ошибки для M_{PVA} все равно остаются очень высокими, а для K_C величина средней стандартной ошибки определения ниже, чем для более стабильного K_p . Для M_{PVA} глубокофокусных событий, а также всех остальных магнитуд и энергетического класса K_p величина $\bar{\sigma}$ рассчитывалась для значений, полученных по данным как минимум двух станций.

Отдельно получена стандартная ошибка определения магнитуд M_L и M_{PVA} для глубокофокусных ($h > 250$ км) землетрясений с очагами в пределах Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны, эпицентры которых попадают в пределы исследуемого района. В табл. 1 эти значения приведены в столбцах $M_L(d)$ и $M_{PVA}(d)$, величины для коровых событий обозначены соответственно $M_L(c)$ и $M_{PVA}(k3)$.

По данным сейсмологического бюллетеня ЖМА [15] были получены среднее стандартное

отклонение стационарной оценки и средняя стандартная ошибка определения магнитуды M_L для коровых $M_L(c)$ и глубоких $M_L(d)$ землетрясений региона. Для этого использованы три выборки землетрясений в пределах района исследований в период январь–март 2020 г., январь–март 2021 г. и январь–март 2022 г. (3 раза по 7–8 декад).

Результаты и обсуждение

В настоящий момент при оперативном определении параметров коровых сахалинских землетрясений РИОЦ «Южно-Сахалинск» наиболее часто использует три энергетических характеристики: магнитуда M_L , энергетические классы K_p и K_C . Поэтому для унификации каталога в первую очередь имеет смысл связать регрессионными соотношениями эти три величины.

На рис. 2 а показана полученная методом GOR зависимость между M_L и K_p . Большое количество данных позволило получить устойчивую зависимость в широком диапазоне применимости:

$$0 \leq M_L \leq 5.5, 5.0 \leq K_p \leq 13.0;$$

$$M_L = 0.68(\pm 0.01)K_p - 3.27(\pm 0.11). \quad (4)$$

Ранее в работе [4] уже публиковалась зависимость между этими величинами по данным каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2017–2021 гг. На рис. 2 а она показана зеленой линией. При вычислении методом GOR в [4] было сделано допущение, что ошибка определения энергетического класса вдвое превышает ошибку определения магнитуды ($\eta = 0.25$). Это предположение подтвердилось в данной работе (табл. 1). Добавление данных наблюдений еще за три года слабо повлияло на зависимость. Наклон кривой немного увеличился, однако разница в расчете по двум зависимостям не превышает для верхнего предела применимости ($M_L = 5.5$) 0.12 магнитудной единицы. Для получения новой зависимости использовано в 5 раз больше пар значений, что позволило сильно снизить погрешность определения коэффициентов регрессионной прямой и расширить пределы применимости.

На рис. 2 б показана зависимость между M_L и энергетическим классом Соловьева K_C :

$$0.5 \leq M_L \leq 5.0, 3.5 \leq K_C \leq 11;$$

$$M_L = 0.63(\pm 0.02)K_C - 1.79(\pm 0.14). \quad (5)$$

Опубликованная в [4] зависимость получена по обобщенному каталогу Сахалинского и Курило-Охотского регионов, причем большая часть данных взята именно по курильским землетрясениям. По этой причине полученная в [4] зависимость (зеленая линия на рис. 2 б) отличается от новой на ≈ 0.2 величины M_L для всего диапазона значений. Это подтверждает целесообразность получения отдельных переходных соотношений для разных регионов зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН. Также на рис. 2 б показана зависимость между M_L и классом Соловьева K_C по версии каталогов ОСОСД, опубликованная в [4]. Как упоминалось выше, неясные методические особенности определения этой величины разными отделами СФ приводят к существенному расхождению результатов. Это показывает нежелательность использования ранее применявшихся в ОСОСД переходных формул к данным РИОЦ.

Магнитуда по объемной волне Р – M_{PVA} [18] не слишком часто определяется для сахалинских землетрясений. Вероятнее всего, это связано с высоким разбросом ее оценки по отдельным станциям и, как следствие, слабым доверием к этой шкале у операторов. На рис. 2 с показано полученное методом GOR соотношение между M_L и M_{PVA} для коровых ($h \leq 40$ км) землетрясений Сахалинского региона:

$$1.0 \leq M_L \leq 5.0, 3.0 \leq M_{PVA} \leq 5.0;$$

$$M_L = 1.95(\pm 0.27)M_{PVA} - 4.81(\pm 1.07). \quad (6)$$

Малое количество данных и узкий диапазон значений не позволяют оценить коэффициенты переходного соотношения с высокой точностью.

Для сравнения на рис. 2 приведена зависимость между M_L и M_{PVA} из [4], полученная для землетрясений преимущественно Курило-Охотского региона 2017–2021 гг. для всего диапазона глубин (синяя линия). Очевидна

существенная разница между двумя соотношениями.

Глубокофокусные землетрясения в пределах Сахалинского региона в основном происходят в диапазоне глубин $h = 250\text{--}600$ км. Таким образом, сейсмические волны от таких собы-

тий подходят на ближайšie региональные сейсмостанции снизу. С одной стороны, это затрудняет определение M_L , так как для ближайших сейсмостанций $\Delta < h$. С другой стороны, особенность записи таких событий с четким выделением максимумов фаз P- и S-волн по-

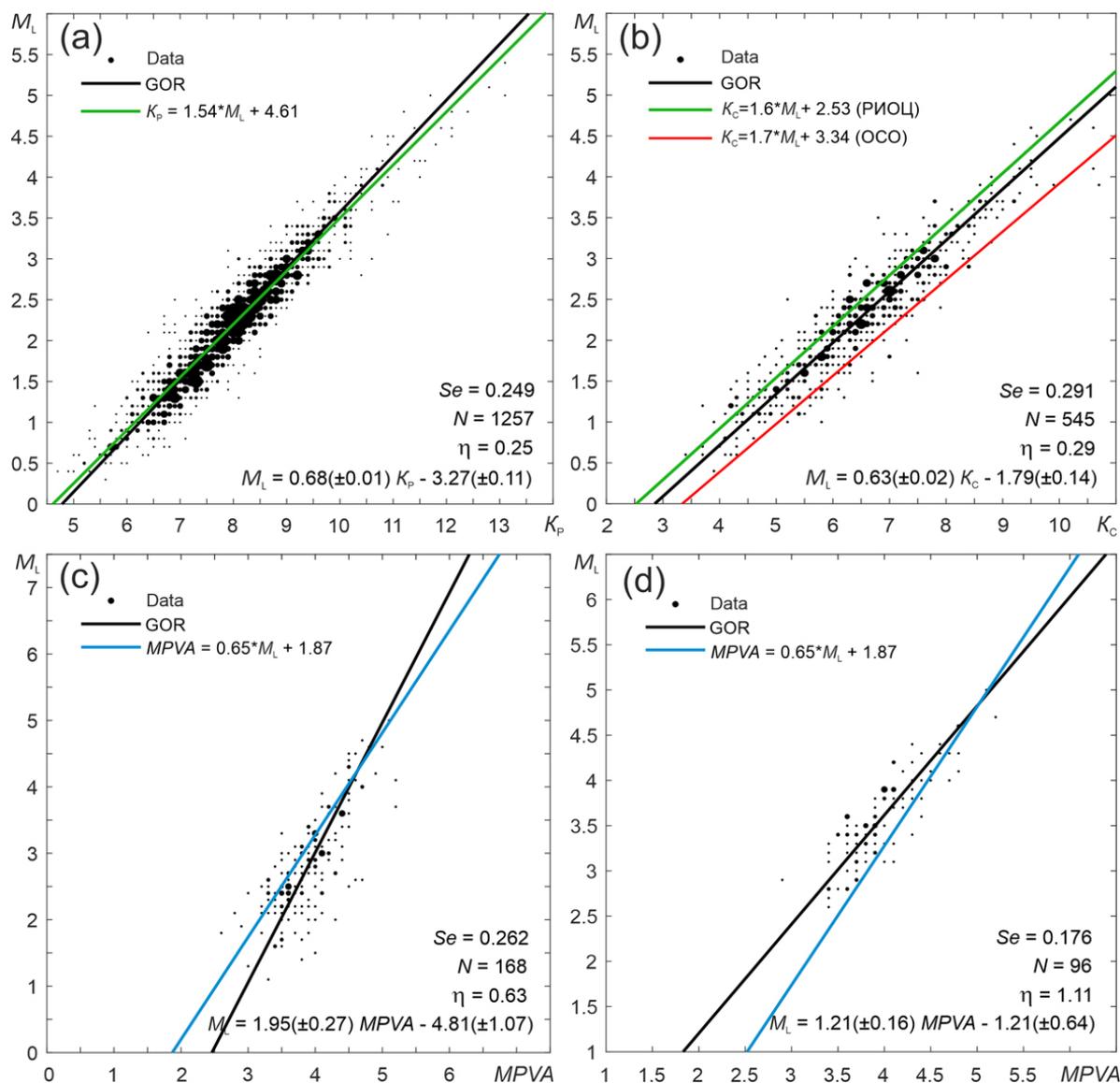


Рис. 2. Зависимость между магнитудой M_L и другими энергетическими характеристиками землетрясений каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» СФ ФИЦ ЕГС РАН 2017–2024 гг.: (а) энергетическим классом Раутиан K_p ; (б) энергетическим классом Соловьева K_C ; (с) магнитудой M_{PVA} коровых ($h < 40$ км) землетрясений; (д) магнитудой M_{PVA} глубокофокусных ($h = 250\text{--}600$ км) землетрясений. Размер кружков увеличивается с ростом числа данных в них. Черной линией показана линейная зависимость, полученная методом GOR, приведены регрессионные уравнения, количество пар значений N , стандартная ошибка регрессии Se и коэффициент η . Цветными линиями показаны варианты зависимости, предложенные в работе [4].

Fig. 2. The relationship between the magnitude M_L and other energy characteristics of earthquakes in the catalog of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPС of the SF FRC GS RAS from 2017 to 2024: (a) Rautian’s energy class K_p ; (b) Soloviev’s energy class K_C ; (c) the magnitude M_{PVA} of crustal ($h < 40$ km) earthquakes; (d) the magnitude M_{PVA} of deep-focus ($h = 250\text{--}600$ km) earthquakes. The size of the dots is proportional to the amount of data. The black line shows the linear dependency obtained by the GOR method. The regression equations, the number of pairs of values N , the standard error of the regression Se and the coefficient η are given. The colored lines show the dependency options proposed in the paper [4].

зволяет снимать замеры амплитуд и периодов с высокой точностью, это приводит к значительному уменьшению стандартной магнитудной ошибки, что подтверждают расчеты (табл. 1). На рис. 2 d показана зависимость между M_L и M_{PVA} для глубокофокусных землетрясений исследуемого района:

$$2.5 \leq M_L \leq 5.0, 3.0 \leq M_{PVA} \leq 5.5:$$

$$M_L = 1.21(\pm 0.16) M_{PVA} - 1.21(\pm 0.64). \quad (7)$$

Полученная формула существенно отличается от формулы (6) для коровых событий, а также от формулы для всего диапазона глубин из [4], которая усреднила данные землетрясений с разной глубиной очага, вследствие чего синяя линия на рис. 2 с и 2 d имеет коэффициент наклона средний между значениями зависимостей (6) и (7). В работе [12] автор с использованием данных каталога Курило-Охотского региона СФ ФИЦ ЕГС РАН показал, что в параметрах магнитудной шкалы M_{PVA} слабо учтена зависимость от глубины очага, поэтому формулы для пересчета из M_{PVA} в другие магнитуды для событий с глубиной очага до 70 км и более глубоких должны быть разные. Верность этого утверждения удалось продемонстрировать на основе каталога РИОЦ.

Переходные соотношения между M_L и M_{PVA} не отличаются высокой точностью в связи с малым количеством данных. С ростом числа наблюдений необходимо их уточнить и более подробно исследовать зависимость этих магнитуд от глубины очага.

Зависимость между двумя энергетическими классами, определяемыми в Сахалинском регионе,

$$K_C = K_P - 1.7(\pm 0.3) \quad (8)$$

была получена Л.С. Оскорбиным и Л.Ф. Волковой по данным 300 сахалинских землетрясений, магнитудой не превышающих $M = 4.5$ [19]. Можно проверить выполнение этой простой зависимости на основе данных каталога РИОЦ за 2017–2024 гг. На рис. 3 а показана регрессионная зависимость между энергетическими классами, полученная методом GOR с учетом полученных выше стандартных ошибок определения этих величин:

$$4.0 \leq K_C \leq 11.0, 5.0 \leq K_P \leq 12.0:$$

$$K_C = 1.05(\pm 0.04)K_P - 2.07(\pm 0.29). \quad (9)$$

Как видно из сравнения положения линий зависимостей (8) (зеленая на рис. 3 а) и (9) (черная на рис. 3 а), разница между двумя энергетическими классами остается почти постоянной для слабых землетрясений в диапазоне имеющих для сравнения данных. Для быстрого перехода между K_C и K_P можно продолжать использовать соотношение (8), возможная ошибка пересчета по сравнению с (9) при этом будет меньше средней стандартной ошибки определения энергетического класса. Сравнение показало также устойчивость этих энергетических шкал. По всей видимости, методика определения соблюдается достаточно хорошо.

В работе [4] отмечалась высокая степень схожести оценок магнитуды M_L землетрясений Сахалинского и Курило-Охотского региона за период 2017 – март 2020 г. с магнитудой Японского метеорологического агентства [15] M_j :

$$M_j = 1.02(0.03)M_L - 0.04(0.10). \quad (10)$$

С учетом возможной ошибки определения коэффициентов зависимости (10) можно считать, что $M_j \approx M_L$. Это объясняется изначальной калибровкой шкалы JMA по магнитуде Ч.Ф. Рихтера и позволяет легко сопоставлять магнитуду региональных землетрясений соседних сейсмологических агентств, а также использовать M_j , которая применяется в регионе уже свыше полувека, как эталон и прокси-магнитуду для установления простых переходных соотношений к другим региональным и глобальным шкалам, прямой пересчет которых в региональную M_L затруднен отсутствием необходимого для сравнения объема данных. Однако необходимо проверить выполнение зависимости (10) для землетрясений Сахалинского региона.

На рис. 3 б показано облако значений M_j в сравнении с M_L для коровых землетрясений Сахалинского региона (преимущественно южной его части, расположенной ближе к сейсмологической сети Японии). Рассчитанное методом GOR соотношение, полученное по этим данным:

$$2.0 \leq M_L \leq 4.5, 2.0 \leq M_j \leq 4.5:$$

$$M_L = 0.95(\pm 0.07)M_j + 0.11(\pm 0.20). \quad (11)$$

Малое количество пар значений и узкий диапазон данных не позволяют получить надежную переходную формулу, однако, с уче-

том точности определения коэффициентов регрессии, действительно можно считать для коровых землетрясений Сахалина $M_j \approx M_L$. Новое соотношение получилось несколько отличным от предыдущего (синяя линия на рис. 3 б), основная причина отличия – использование

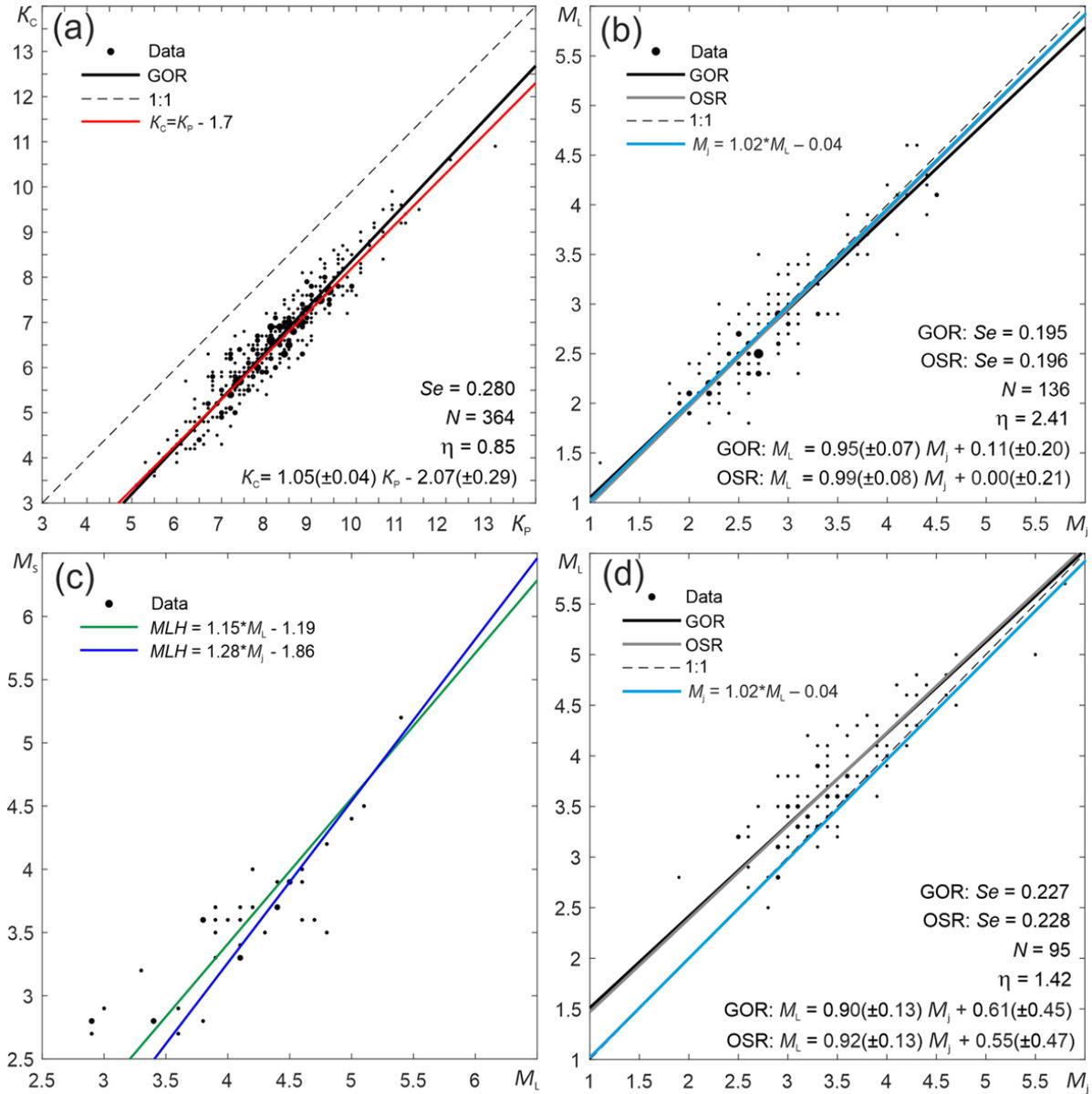


Рис. 3. Зависимость между энергетическими характеристиками землетрясений Сахалинского региона: (а) энергетическими классами Раутиана K_p и Соловьева K_c ; (б) магнитудами M_j и M_L для коровых ($h < 40$ км) землетрясений; (с) магнитудами M_L и M_S ; (д) магнитудами M_j и M_L для глубоких ($h = 250-600$ км) землетрясений. Сплошной черной линией показана линейная зависимость, полученная методом GOR, серой – методом OSR. Приведены регрессионные уравнения, количество пар значений N , стандартная ошибка регрессии Se и коэффициент η . Цветными линиями показаны варианты зависимости, предложенные в работах [4, 19, 20].

Fig. 3. The relationship between the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region: (a) the energy classes of Rautian's K_p and Soloviev's K_c ; (b) the magnitudes M_j and M_L for crustal ($h < 40$ km) earthquakes; (c) the magnitudes M_L and M_S ; (d) the magnitudes M_j and M_L for deep ($h = 250-600$ km) earthquakes. The solid black line shows the linear relationship obtained by the GOR method; the gray line shows the one obtained by the orthogonal standard regression method. Regression equations, the number of pairs of values N , the standard error of the regression Se and the coefficient η are given. The colored lines show the dependency options proposed in the papers [4, 19, 20].

метода GOR. При расчете методом OSR (серая линия на рис. 3 б), который ранее был применен для получения (10), соотношение получается мало отличимым.

Отдельно была рассчитана зависимость между M_j и M_L для глубокофокусных землетрясений Сахалинского региона:

$$2.5 \leq M_L \leq 5.0, 2.5 \leq M_j \leq 5.0:$$

$$M_L = 0.90(\pm 0.13)M_j + 0.61(\pm 0.45). \quad (12)$$

Ввиду еще меньшего количества данных и их большого разброса ошибка определения коэффициентов очень велика, тем не менее очевидно, что полученное соотношение (рис. 3 д) отличается от (10). Для глубокофокусных землетрясений магнитуда M_L определяется с занижением относительно M_j , увеличивающимся с уменьшением магнитуды событий. Ранее нами изучалась [4] устойчивость определения M_L в сравнении с M_j для глубоких ($h > 60$ км) землетрясений на основе каталога Курило-Охотского региона 2017 – марта 2020 г., но такого эффекта выявлено не было. В каталоге преимущественно присутствовали события промежуточной глубины ($h = 60–300$ км), для которых было установлено $M_j \approx M_L$. Более глубокие землетрясения отдельно не исследовались, так как в собранном для сравнения каталоге их было слишком мало. Несомненно, соотношения (11) и (12) требуют пересмотра после накопления большего количества данных, однако с учетом имеющихся можно констатировать, что величины M_j и M_L в Сахалинском регионе действительно близки, хотя о полном совпадении шкал M_j и M_L речь не идет. Для коровых землетрясений разница в определении магнитуд событий лежит в пределах стандартной ошибки определения. Для глубокофокусных событий региона необходимо учитывать некоторое занижение магнитудных оценок.

Наиболее сложный вопрос, который необходимо решить для изучения сейсмичности Сахалинского региона на основе каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН, – расчет сейсмической энергии. В статьях, посвященных региональной сейсмичности Сахалинского региона [21], мы ранее использовали для расчета сейсмической энергии E формулу Гутенберга–Рихтера [22]:

$$\lg E = 4.8 + 1.5M, \quad (13)$$

где под M понимается магнитуда по поверхностной волне M_S (в случае каталога ОСОСД – M_{LH}). Каталог РИОЦ «Южно-Сахалинск» содержит определения M_S , однако в пределах исследуемого района их очень немного ($N = 43$ за рассматриваемый период). Хорошим вариантом было бы получить переходную формулу между M_S и M_L каталога РИОЦ для Курило-Охотского региона и распространить ее на Сахалинский регион, это допустимо, поскольку M_S определяется в основном для достаточно сильных неглубоких событий по записи станций, расположенных на расстоянии не менее $\Delta = 1^\circ$ от эпицентра, т.е. используются как региональные, так и телесейсмические сейсмостанции, а потому локальные особенности распространения сейсмических волн не должны оказывать столь заметного влияния. Однако данные расчеты выходят за рамки настоящей работы. В статье [4] приведена такая зависимость, полученная для очень небольшой выборки ($N = 46$) курильских землетрясений:

$$M_{LH} = 1.15(\pm 0.26) M_L - 1.19(\pm 1.29). \quad (14)$$

Учитывая высокую погрешность полученных коэффициентов регрессии, эту зависимость сложно рекомендовать к использованию. В качестве альтернативного варианта можно применить зависимость между M_{LH} и M_j , полученную автором на основе большого количества данных ($N = 964$) о неглубоких ($h \leq 60$ км) землетрясениях Курило-Охотского региона [20]:

$$M_{LH} = 1.28(\pm 0.06)M_j - 1.86(0.29), \quad (15)$$

в предположении, что $M_j \approx M_L$.

На рис. 3 с показаны пары значений магнитуд M_L и M_S каталога Сахалинского региона с 2017 по октябрь 2024 г. Обе линии, отвечающие выражениям (14) и (15), проходят примерно через центр облака значений, в стороне остается лишь несколько наиболее слабых событий с $M_S < 3.0$, определение магнитуды которых несколько сомнительно, так как на расстоянии $\Delta > 1^\circ$ поверхностные волны слабых

сейсмических событий чаще всего сложно отличить от сейсмического шума. Обе предложенные формулы с примерно одинаковой (довольно низкой) точностью позволяют оценить величину M_S региональных землетрясений пересчетом из M_L , а следовательно, получить оценку сейсмической энергии.

Другим вариантом расчета сейсмической энергии коровых землетрясений, часто применяемым в филиалах ФИЦ ЕГС РАН [9], является использование энергетического класса Раутиан [6]:

$$\lg E = K_p. \quad (16)$$

Применив для пересчета полученные соотношения (4) и (9), можно получить оценку сейсмической энергии для всех слабых и умеренно-сильных ($M < 5.6$) коровых землетрясений Сахалинского региона. Для более сильных событий обычно доступен вариант с непосредственно определенной магнитудой M_S и формулой (13). Необходимо учитывать, что затухание сейсмической энергии в земной коре Сахалинского региона выше, чем в условиях континентальной коры, потому использование K_p может привести к ее недооценке.

Таким образом, проблему оценки сейсмической энергии землетрясений каталога РИОЦ

«Южно-Сахалинск» пока нельзя считать решенной, необходимо большее количество данных. Предложенные варианты можно рассматривать как временную меру.

Полученные методом GOR соотношения собраны в табл. 2. В графе «диапазон применения» приведены границы применимости для величины, указанной в скобках в графе «сравниваемые величины». С учетом обычно линейной связи между однотипными магнитудами по объемным волнам, определяемыми в близких частотных диапазонах (к которым с оговоркой на масштаб можно отнести и энергетические классы), границы применимости можно немного расширить в обе стороны.

Заключение

Подготовлен рабочий каталог параметров землетрясений Сахалинского региона за период с 2017 по октябрь 2024 г. по данным РИОЦ «Южно-Сахалинск», входящего в структуру СФ ФИЦ ЕГС РАН. На их основе рассчитаны средние стандартные ошибки определения двух магнитуд и двух энергетических классов землетрясений, наиболее часто встречающихся в каталоге РИОЦ.

Таблица 2. Регрессионные соотношения между энергетическими характеристиками землетрясений Сахалинского региона по данным РИОЦ «Южно-Сахалинск» и JMA, полученные методом GOR

Table 2. Regression relationships between the energy characteristics of earthquakes in the Sakhalin region according to the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC and JMA data obtained by the GOR method

№	Сравниваемые величины	η	N	Se	Регрессионное соотношение	Диапазон применимости
1	$M_L(K_p)$	0.25	1257	0.249	$M_L = 0.68(\pm 0.01)K_p - 3.27(\pm 0.11)$	5.0–13.0
2	$M_L(K_C)$	0.29	545	0.291	$M_L = 0.63(\pm 0.02)K_C - 1.79(\pm 0.14)$	3.5–11.0
3	$M_L(M_{PVA})$ с	0.63	243	0.309	$M_L = 1.95(\pm 0.27)M_{PVA} - 4.81(\pm 1.07)$	3.0–5.0
4	$M_L(M_{PVA})$ d	1.11	96	0.176	$M_L = 1.21(\pm 0.16)M_{PVA} - 1.21(\pm 0.64)$	3.0–5.5
5	$K_C(K_p)$	0.85	364	0.280	$K_C = 1.05(\pm 0.04)K_p - 2.07(\pm 0.29)$	5.0–12.0
6	$M_L(M_j)$ с	2.41	136	0.195	$M_L = 0.95(\pm 0.07)M_j + 0.11(\pm 0.20)$	2.0–4.5
7	$M_L(M_j)$ d	1.42	95	0.227	$M_L = 0.90(\pm 0.13)M_j + 0.61(\pm 0.45)$	2.5–5.0

Примечания. Допуски коэффициентов регрессии приведены для 95% доверительной вероятности. N – количество пар значений, Se – ошибка регрессии. Пометы с и d означают соотношения, полученные, соответственно, для коровых ($h < 40$ км) и глубоких ($h = 250–600$ км) землетрясений региона.

Notes. The regression coefficients are given with confidence level of 95%. N , number of pairs of value; Se , regression error. The marks c and d indicate the relationships obtained for crustal ($h < 40$ km) and deep ($h = 250–600$ km) earthquakes respectively.

Методом обобщенной ортогональной регрессии (GOR) рассчитаны соотношения, связывающие магнитуду коровых ($h \leq 40$ км) землетрясений M_L и энергетические классы K_p и K_c . Это позволяет унифицировать по любой из этих величин магнитуду каталога землетрясений Сахалинского региона. Также получены переходные соотношения к M_L от короткопериодной магнитуды M_{pVA} как для коровых, так и для глубокофокусных ($h = 250\text{--}600$ км) землетрясений. Однако в связи с малым количеством определений M_{pVA} эти зависимости остаются не слишком надежными и нуждаются в уточнении после накопления большего количества данных.

Получено соотношение между M_L и магнитудой Японского метеорологического агентства M_j . Подтверждено для неглубоких землетрясений Сахалина примерное равенство шкал $M_j \approx M_L$ [4]. Для глубокофокусных событий отмечена некоторая недооценка величины M_L относительно M_j .

На основе имеющихся данных удалось показать, что полученные ранее по курильскому каталогу зависимости $M_{LH}(M_L)$ [4] и $M_{LH}(M_j \approx M_L)$ [20] могут послужить временным решением проблемы перехода от упомянутых выше энергетических характеристик землетрясений к магнитудам по поверхностной волне M_S либо M_{LH} , что необходимо для расчета сейсмической энергии по формуле Гутенберга–Рихтера. В качестве альтернативного варианта можно перейти на расчет энергии землетрясений через K_p , хотя в этом случае связать новые данные с оценками энергии землетрясений прошлых лет будет затруднительно.

В дальнейшем предполагается с учетом новых данных провести аналогичную работу по уточнению межмагнитудных зависимостей каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» для Курило-Охотского региона, а также для Приамурья и Приморья. Так как в Курило-Охотском регионе происходит больше сильных землетрясений, это позволит получить устойчивые связи с редко встречающимися в сахалинском каталоге магнитудами M_S , M_{pV} .

Список литературы

1. Droznin D.V., Droznina S. Ya. **2011**. Interactive DIMAS program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 47(3): 215–224. <https://doi.org/10.3103/S0747923911030054>
2. Чебров В.Н., Гусев А.А., Гусяков В.К., Мишакин В.Н., Поплавский А.А. **2009**. Концепция развития системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. *Сейсмические приборы*, 45(4): 41–57.
3. Поплавская Л.Н., Бобков А.О., Кузнецова В.Н., Ногорных Т.А., Рудик М.И. **1989**. Принципы формирования и состава алгоритмического обеспечения регионального центра обработки сейсмологических наблюдений (на примере Дальнего Востока). В кн.: *Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР (Методические работы ЕССН)*. М.: Наука, с. 32–50.
4. Safonov D.A., Semenova E.P. **2022**. Regional magnitude M_w in the Russian Far East. *Seismic Instruments*, 58(Suppl 1): S42–S57. <https://doi.org/10.3103/S074792392207009X>
5. Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. **1967**. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой курильских землетрясений. *Физика Земли*, 2: 13–22.
6. Раутиан Т.Г. **1964**. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км. *Экспериментальная сейсмика*. М.: Наука, 88–93. (Труды ИФЗ АН СССР; № 32(199)).
7. *Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР*. **1982**. Отв. сост. Кондорская Н.В., Аранович З.И., Шебалин Н.В. М.: Наука, 273 с.
8. Richter C.F. **1935**. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. of the Seismological Society of America*, 25: 1–32.
9. Маловичко А.А., Петрова Н.В., Габсатарова И.П., Левина В.И., Михайлова Р.С., Курова А.Д. **2023**. Сейсмичность Северной Евразии в 2018–2019 гг. *Землетрясения Северной Евразии*, 26 (2018–2019 гг.): 10–38. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.01>; EDN: ZSVQJD
10. Castellaro S., Mulargia F., Kagan Y.Y. **2006**. Regression problems for magnitudes. *Geophysical Journal International*, 165(3): 913–930. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02955.x>
11. Hall J. **2023**. Linear deming regression. *MATLAB Central File Exchange*. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33484-linear-deming-regression> (accessed October 11, 2023).
12. Сафонов Д.А. **2024**. Переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Курило-Охотского региона. *Вопросы инженерной сейс-*

- мологии, 51(2): 102–117. doi: 10.21455/VIS2024.2-6; EDN: ZHBDUT
13. Fuller W.A. **1987**. *Measurement error models*. New York: John Wiley, 458 p.
 14. Wason H.R., Das R., Sharma M.L. **2018**. Regression relations for magnitude conversion for the Indian Region. In: *Advances in Indian Earthquake Engineering and Seismology*. Springer, Cham, p. 55–66. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76855-7_4
 15. JMA. **2024**. *Japan Meteorological Agency. The Seismological Bulletin of Japan*. URL: https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index_e.html (accessed December 13, 2024).
 16. NIED. **2024**. *National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan*. URL: <http://www.fnet.bosai.go.jp> (accessed December 13, 2024).
 17. Lolli B., Gasperini P., Vannucci G. **2014**. Empirical conversion between teleseismic magnitudes (m_b and M_s) and moment magnitude (M_w) at the Global, Euro-Mediterranean and Italian scale. *Geophysical Journal International*, 199(2): 805–828. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu264>
 18. Волкова Л.Ф., Поплавская Л.Н. **1989**. Региональная шкала MPV(A) для оценки магнитуд дальневосточных землетрясений с нормальной глубиной очага. В кн.: *Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке*. Владивосток, с. 39–40.
 19. Оскорбин Л.С., Волкова Л.Ф. **1978**. Параметры основного толчка и сейсмический режим афтершоков Монеронского землетрясения 5(6) сентября 1971 г. В кн.: *Обработка сейсмологических наблюдений и поиск предвестников землетрясений на Дальнем Востоке*, Южно-Сахалинск, с. 68–87.
 20. Сафонов Д.А. **2025**. Соотношение между магнитудами M_{LH} и M_w для Курило-Охотского региона и его использование для транзитных пересчетов в другие магнитуды. *Вулканология и сейсмология*, 2: 20–37.
 21. Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В. **2023**. Сейсмичность Приамурья и Приморья, Сахалина и Курило-Охотского региона в 2018–2019 гг. *Землетрясения Северной Евразии*, 26 (2018–2019 гг.): 154–170. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.01>
 22. Richter C.F. **1958**. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
 - developing a seismologic observation system for tsunami warning in the Russian Far East. *Seismic Instruments*, 46: 275–285. <https://doi.org/10.3103/S0747923910030096>
 3. Poplavskaya L.N., Bobkov A.O., Kuznetsova V.N., Nagornyykh T.A., Rudik M.I. **1989**. [Principles of formation and composition of algorithmic support of the regional center for processing seismological observations (using the example of the Far East)]. In: *[Seismological observations in the USSR Far East (Methodological works of the ESSN)]*. Moscow: Nauka, p. 32–50 (In Russ.).
 4. Safonov D.A., Semenova E.P. **2022**. Regional magnitude M_{wa} in the Russian Far East. *Seismic Instruments*, 58(Suppl 1): S42–S57. <https://doi.org/10.3103/S074792392207009X>
 5. Soloviev S.L., Solovieva O.N. **1967**. [Relationship between the energy class and the magnitude of Kuril earthquakes]. *Fizika Zemli*, 2: 13–23. (In Russ.).
 6. Rautian T.G. **1964**. [On determining the energy of earthquakes at distances up to 3000 km]. In: *Eksperimental'naya seismika = Experimental seismic*. Moscow: Nauka, p. 88–93. (Trudy IFZ AN SSSR; № 32(199)). (In Russ.).
 7. *Instruktsiya o poryadke proizvodstva i obrabotki nablyudeniy na seysmicheskikh stantsiyakh Yedinoi sistemy seysmicheskikh nablyudeniy SSSR*. [Instructions on the procedure for making and processing observations at the seismic stations of the Unified Seismic Observation Service (ESSN USSR)]. **1982**. Comp. Kondorskaya N.V., Aranovich Z.I., Shebalin N.V. Moscow: Nauka, 273 p. (In Russ.).
 8. Richter Ch.F. **1935**. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. of the Seismological Society of America*, 25: 1–32. <https://doi.org/10.1785/bssa0250010001>
 9. Malovichko A.A., Petrova N.V., Gabsatarova I.P., Levina V.I., Mikhailova R.S., Kurova A.D. **2023**. [Seismicity of Northern Eurasia in 2018–2019]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii = Seismicity of Northern Eurasia*, 26(2018–2019): 10–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.01>
 10. Castellaro S., Mulargia F., Kagan Y.Y. **2006**. Regression problems for magnitudes. *Geophysical Journal International*, 165(3): 913–930. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02955.x>
 11. Hall J. **2023**. Linear deming regression. *MATLAB Central File Exchange*. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33484-linear-deming-regression> (accessed October 11, 2023).
 12. Safonov D.A. **2024**. Relationships for conversion of energy characteristics of earthquakes in the Kuril-Okhotsk region. *Voprosy inzhenernoj seismologii*, 51(2): 102–117. (In Russ.). doi: 10.21455/VIS2024.2-6

References

- 1 Droznin D.V., Droznina S.Ya. **2011**. Interactive DIMAS program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 47(3): 215–224. <https://doi.org/10.3103/S0747923911030054>
- 2 Chebrov V.N., Gusev A.A., Gussyakov V.K., Mishatkin V.N., Poplavskiy A.A. **2010**. Concept for

13. Fuller W.A. **1987**. *Measurement error models*. New York: John Wiley, 458 p. <https://doi.org/10.1002/9780470316665>
14. Wason H.R., Das R., Sharma M.L. **2018**. Regression relations for magnitude conversion for the Indian Region. In: *Advances in Indian Earthquake Engineering and Seismology*. Springer, Cham, p. 55–66. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76855-7_4
15. JMA. **2024**. *Japan Meteorological Agency. The Seismological Bulletin of Japan*. URL: https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index_e.html (accessed December 13, 2024).
16. NIED. **2024**. *National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan*. URL: <http://www.fnet.bosai.go.jp> (accessed December 13, 2024).
17. Lolli B., Gasperini P., Vannucci G. **2014**. Empirical conversion between teleseismic magnitudes (m_b and M_s) and moment magnitude (M_w) at the Global, Euro-Mediterranean and Italian scale. *Geophysical Journal International*, 199(2): 805–828. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu264>
18. Volkova L.F., Poplavskaya L.N. **1989**. [Regional MPV(A) scale for estimating magnitudes of the Far Eastern earthquakes with normal focal depth]. In: *[Seismology and earthquake-resistant construction in the Far East]*. Vladivostok, p. 39–40 (In Russ.).
19. Oskorbin L.S., Volkova L.F. **1978**. [Parameters of the main shock and the seismic regime of the aftershocks of the Moneron earthquake on September 5(6), 1971]. In: *[Processing of seismological observations and search for earthquake precursors in the Far East]*. Yuzhno-Sakhalinsk, p. 68–87 (In Russ.).
20. Safonov D.A. **2025**. [Relationship between the magnitudes M_{LH} and M_w for the Kuril-Okhotsk region and its use for transit calculations to other magnitudes]. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2: 20–37.
21. Fokina T.A., Safonov D.A., Kostylev D.V. **2023**. Seismicity of the Amur Region and Primorye, Sakhalin and the Kuril-Okhotsk region in 2018–2019. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii = Earthquakes of Northern Eurasia*, 26 (2018–2019): 154–170. doi: 10.35540/1818-6254.2023.26.13
22. Richter C.F. **1958**. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.

Об авторе

Сафонов Дмитрий Александрович (<https://orcid.org/0000-0002-2201-2016>), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, d.safonov@imgg.ru

Поступила 29.12.2024

Принята к публикации 02.02.2025

About the Author

Safonov, Dmitry A. (<https://orcid.org/0000-0002-2201-2016>), Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher of the Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, d.safonov@imgg.ru

Received 29 December 2024

Accepted 2 February 2025



Tectonophysical digital database of Sakhalin Island*

*Pavel A. Kamenev¹@, Anton V. Marinin², Lidia A. Sim², Leonid M. Bogomolov¹,
Anton R. Lukmanov², Vladislav A. Degtyarev¹*

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

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

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

Abstract. The paper summarizes the results of field tectonophysical studies of Sakhalin Island conducted by different researchers at different times. Information about the main characteristics of the stress-strained state of the upper part of the Earth's crust (principal stress axes, stress state type, Lode–Nadai coefficient, bedding planes) was obtained as a result of computations using methods of cataclastic analysis of discontinuous displacements, structural-paragenetic, kinematic, conjugate pairs of faults. The input data for the calculations were the materials of field measurements of fracturing, slickensides and structural patterns. The results obtained in the present and previous works on Sakhalin field tectonophysical research are represented in summary tables that include data on local stress states for 264 observation points. The results are incorporated to GIS, the Isoline GIS software is used for the database management system.

Keywords: fracturing, slickensides, stress-strained state of the Earth's crust, principal stress axes, Lode–Nadai coefficient

Тектонофизическая цифровая база данных территории острова Сахалин

*П. А. Каменев¹@, А. В. Маринин², Л. А. Сим², Л. М. Богомолов¹,
А. Р. Лукманов², В. А. Дегтярев¹*

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

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

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

Резюме. База тектонофизических данных по о. Сахалин, создаваемая коллективом авторов из Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, обобщает результаты полевых исследований деформации горных пород и геологических тел на территории острова за период с 1973 по 2023 г. Сведения об основных характеристиках напряженно-деформированного состояния верхней части земной коры (оси главных напряжений, тип напряженного состояния, коэффициент Лодэ–Надаи, элементы залегания слоистости) получены в результате расчетов методами катакlastического, структурно-парагенетического и кинематического анализа, а также сопряженных пар сколов. Исходными данными для расчетов служили полевые замеры параметров тектонической трещиноватости, зеркал скольжений и других структурных индикаторов деформаций. Результаты полевых тектонофизических исследований Сахалина, полученные разными исследователями в различное время, сведены в итоговые таблицы, которые включают данные о локальных стресс-состояниях для 264 точек наблюдения. Данные интегрированы с ГИС; в качестве системы управления базой данных используется программный комплекс Isoline GIS.

Ключевые слова: трещиноватость, зеркала скольжения, напряженно-деформированное состояние земной коры, оси главных напряжений, коэффициент Лодэ–Надаи

* The translation from Russian: Каменев П.А., Маринин А.В., Сим Л.А., Богомолов Л.М., Лукманов А.Р., Дегтярев В.А. Тектонофизическая цифровая база данных территории острова Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 1. [Electronic resource]. <http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-1-3.pdf>. Translated by Valeria Maksimova

Полный текст статьи на русском языке см. на сайте журнала «Геосистемы переходных зон»: <http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-1-3.pdf>

For citation: Kamenev P.A., Marinin A.V., Sim L.A., Bogomolov L.M., Lukmanov A.R., Degtyarev V.A. Tectonophysical digital database of Sakhalin Island. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, no. 1, pp. 37–55. (In Russ. & in Engl.). <https://doi.org/10.30730/grz.2025.9.1.037-055>. [The translation from Russian: Каменев П.А., Маринин А.В., Сим Л.А., Богомолов Л.М., Лукманов А.Р., Дегтярев В.А. Тектонофизическая цифровая база данных территории острова Сахалин. [Electronic resource]. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 1. URL: <http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-1-3.pdf>].

Funding and Acknowledgements

The research was carried out with the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS (FWWM-2021-0001) and the state task of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (FMWU-2025-0036). The authors are grateful to Yury V. Kostrov for his support in conducting field research. The authors express special gratitude to Vitaliy M. Yakovlev and Vyacheslav V. Yakovlev for the kindly provided software package Isoline GIS.

Финансирование и благодарности

Исследования проводились в рамках госзадания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (FWWM-2021-0001) и госзадания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (FMWU-2025-0036).

Авторы признательны Ю.В. Кострову за помощь в проведении полевых исследований. Особая благодарность В.М. Яковлеву и В.В. Яковлеву за предоставленный пакет программного обеспечения Isoline GIS.

Introduction

Tectonophysics is a relatively nascent science, yet it possesses a robust methodological framework, both independently and in conjunction with techniques from other disciplines [1]. Currently, tectonophysical methods are actively employed to address problems in geodynamics, tectonics, structural geology, geomechanics, exploration and exploitation of mineral deposits. In an applied context, only these methods enable the reconstruction of the stress-strained state of the Earth's crust, for example, at mineral deposits [2, 3]. In fundamental research, these methods assist, in particular, in refining the boundaries of tectonic plates [4].

On Sakhalin Island, tectonophysical methods were actively implemented in the coal industry in the late 20th century to predict hazardous dynamic and gasodynamic phenomena (rock bursts, coal and gas blowouts). Such events occurred at the Boshnyakovo and Lopatinskoe deposits in Sakhalin mines [2]. Subsequently, the method of cataclastic analysis of discontinuous displacements [5] was utilized to reconstruct the tectonic stresses of the island, incorporating data on earthquake focal mechanisms [6]. In recent years, field tectonophysical studies have been resumed in the articles of L.A. Sim and colleagues [4, 7, 8], and continued by researchers from the

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences in collaboration with researchers from the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IMGG FEB RAS) [9, 10].

Field tectonophysical investigations on Sakhalin are conducted using GIS technologies. This has facilitated the creation of the Sakhalin Island Tectonophysical Database, registered with the Federal Service for Intellectual Property in 2024 [11]. This database encompasses research results from 2020–2023. The objective of the present work is to systematize tectonophysical information obtained using field tectonophysical methods on Sakhalin Island from 1973 to 2023, for its introduction into scientific circulation with open access to all interested researchers. This includes documenting features indicative of past deformation, such as fracturing patterns and the orientation of slickensides, allowing for calculation of principal stress axes and determination of the Lode–Nadai coefficient to characterize the deformation regime.

Area and materials of study

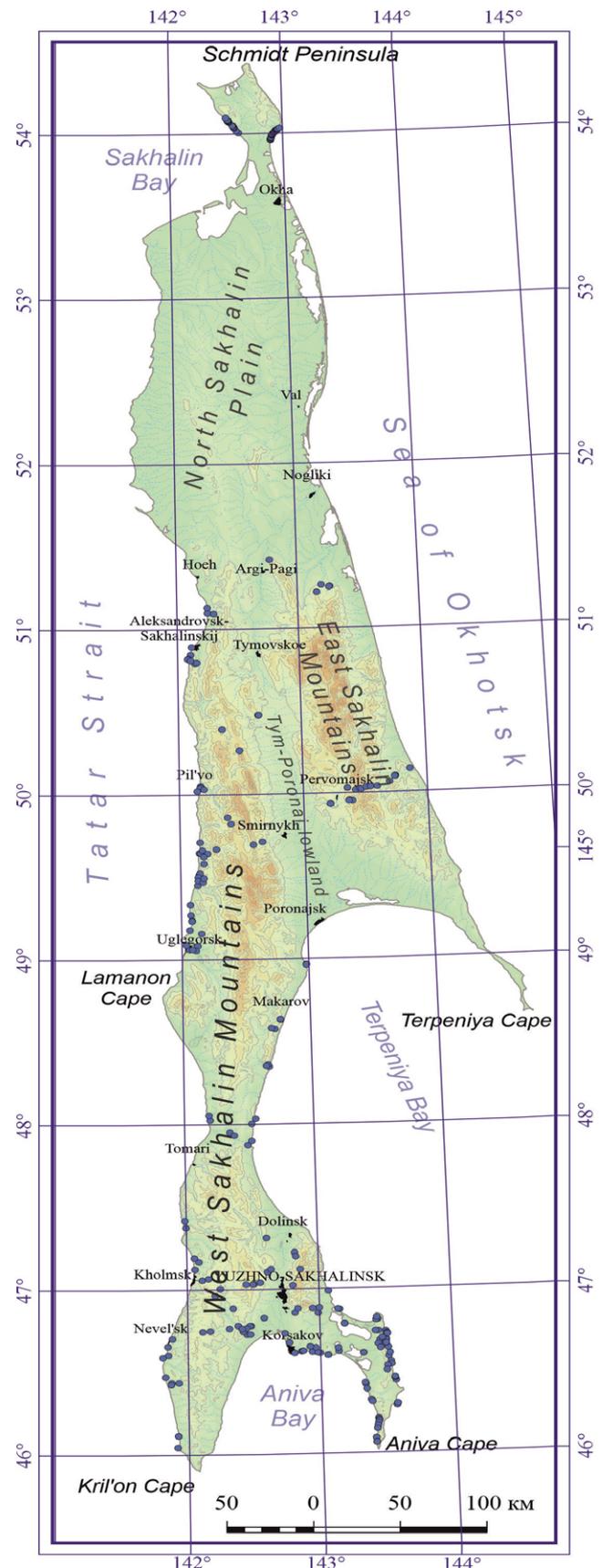
The geological structure of Sakhalin Island predominantly comprises Cretaceous-Cenozo-

ic sedimentary rocks with a minor proportion of volcanogenic formations [12, 13], with the exception of several formations in central and eastern Sakhalin. These exceptional formations consist of volcanogenic ultramafic and metamorphosed strata with a paleontologically validated age ranging from the Silurian to the Jurassic periods [14]. The relatively young age of the sedimentary rocks renders them highly susceptible to exogenic processes, manifesting as intense weathering. A significant part of the island is characterized by low-lying terrain lacking bedrock exposures.

The study area encompasses the entirety of Sakhalin Island where infrastructure facilitates access to outcrop locations. Beyond challenges related to transportation infrastructure, field investigations encounter further difficulties. During winter, snow cover precludes field work. In the summer season, luxuriant vegetation complicates both the detection of outcrops and access to them. Conducting marine traverses along the coastlines is hindered by severe weather conditions, a limited navigation and field work season, the absence of access roads, the presence of a border zone, and other factors.

Consequently, as of today, the northern part of the Schmidt Peninsula, the majority of the North Sakhalin Plain, the eastern coast of the island from Lunsy Bay to the village of Pogradichnoye, the Tym-Poronaysk Lowland and Terpeniya Peninsula, and the eastern coast of Krillion Peninsula remain poorly studied or unstudied.

Our field investigations yielded reliable data on various types of geological stress/strain indicators. Joints, without visible evidence of displacement, is the most widely represented. Less frequently observed are joints with mineralization in the form of crystals and druses, mineral crusts, as well as those lacking mineralization. Particular attention was paid to measurements of slickensides; tectonic stress reconstruction was primarily conducted based on these features, and accordingly, they constitute the foundation of the



Map of the study area with the observation points.

Карта района исследования с нанесенными на нее точками наблюдения.

present work. In reconstructing stresses spatially associated with coal deposits in western Sakhalin, faults ranging from large-amplitude (displacement exceeding 1000 m) to fractures (less than 10 cm) were utilized. However, large-amplitude and medium-displacement (less than 10 m) faults, depicted on tectonic maps of areas with coal deposits, are most fully represented. These data were used for tectonophysical reconstruction, allowing for inference of the stress-strained state of the Earth's crust.

In some observation points, the replacement of certain geological stress indicators by other disjunctive features was recorded. This allowed for the identification of the relative sequence of structural formation.

Unfortunately, the scope of the present work precludes the detailed presentation of all available information. The majority of the research results have been published in our previous articles [3, 4, 7–10], with the corresponding level of detail. Full-scale and detailed results for all study areas are planned for regular posting on a dedicated page of the website of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

As of today, the database of field tectonophysical investigations includes information for 264 observation points. An overview map, indicating these points, is presented below.

Methodology

The data utilized in this study were primarily obtained through the method of cataclastic analysis (MCA) of discontinuous displacements [5], as well as the structural-paragenetic method of analyzing minor disjunctive structures [15], O.I. Gushchenko's kinematic method [16], and M.V. Gzovsky's method of conjugate shear fractures [17]. Furthermore, L.A. Sim's method of generalizing – averaging – the stress field [18] was employed for the synthesis of field tectonophysical data. For processing field measurements of slickensides with established displacement

kinematics, the method of cataclastic analysis [5] and the specifically developed STRESSgeol software [19], based on this method, were used. In addition, a modified algorithm of this method was also applied to process a series of measurements [20].

Quantitative and qualitative characteristics of the reconstructed local stress states were determined using the method of cataclastic analysis. The main characteristics include the angular orientation of the principal stress axes, as well as the magnitudes of the stresses themselves, the type of stress state, and the Lode–Nadai coefficient. The basic principles of the method of cataclastic analysis are based on the concepts of quasi-plastic deformation of the geological medium, as well as the tenets of plasticity theory under conditions of maximum dissipation of internal elastic energy for the calculated stress tensor. The STRESSgeol contains an automated algorithm for separating all data into homogeneous samples, which define the temporal phases of quasi-homogeneous deformation of the macro-volume, ensuring the maximum value of the total dissipation energy with the minimum number of identified phases. This method allows for a thorough examination of the stress-strained state of the Earth's crust.

The structural-paragenetic method of analysis of minor disjunctive structures by L.M. Rastsvetaev is based on the concept of quasi-plastic deformation of the rock mass. This concept ensures the energetic efficiency of displacements along previously formed discontinuities in the rock mass [15]. The method involves the use of the main types of geological stress indicators that describe the overall spatiotemporal series of quasi-plastic deformation of the studied area of rock. Minor disjunctive structures (tectonic fracturing) form certain template structural patterns that are interconnected by spatiotemporal characteristics and can be considered as paragenetic associations, or structural parageneses. Field data were synthesized in the form of structural diagrams and then analyzed both as individual points and

in a group manner in accordance with their place in the tectonic structure of the study area.

O.I. Gushchenko's kinematic method [16] is applied in processing field data on both the position of rupture planes and the orientation of slickensides. The method is based on the postulate of dislocation analysis, from which it follows that, with a known orientation of the principal stress axes, the direction of the displacement vector on the plane of an arbitrarily oriented fracture lies within the angle defined by the extreme values of the Lode–Nadai coefficient. The inverse problem of reconstructing the orientations of tectonic stresses that caused these displacements is solved based on the orientations of the displacement vectors on the ensemble of slickensides.

In M.V. Gzovsky's method of conjugate shear fractures, pairs of shear fractures – isochronous fractures that formed in a homogeneous stress field are selected. The conjugacy of shear fractures in two directions is determined by their merging, mutual intersection, or opposite directions of displacement [17]. The line of intersection of these fractures coincides with the axis of intermediate principal stress, and the bisectors of adjacent angles coincide with the directions of the principal stress axes.

Research results

From 2016 to 2023, a team of researchers conducted several short-term and long-term expeditions, including those for industrial purposes. Most of the results from these field investigations have been published [3, 4, 7–10]. Data systematization resulted in a summary of parameters characterizing the stress-strained state of the Earth's crust (calculated from field measurements) (see Tables 1 and 2 in the Appendix). Table 1 presents: the coordinates of observation points 1–212; the orientations of the principal stress axes (σ_1 , minimum (extension), σ_2 , intermediate, and σ_3 , maximum (compression)), reconstructed using cataclastic analysis (MCA) based on structural-kinematic data from slicken-

sides and joints; the type (environment) of the stress state; the Lode–Nadai coefficient (μ_σ); bedding planes; and the number of measurements at each point (total and those used for calculation in the STRESSgeol). Table 2 (from data in [4]) presents the available information on the principal stress axes. Data from [2, 3] reconstructing the principal stress axes using M.V. Gzovsky's method of conjugate shear fractures are also included.

Alongside other geological and geophysical data [21], the results presented in this study are integrated within a unified digital geoinformation system (GIS). Isoline GIS, provided by the developers for educational and research purposes, serves as our database management system. While primarily oriented towards the oil and gas and mining sectors [22], it provides a functional interface for working with the digital tectonophysical database. Simultaneous visualization and interpretation of diverse geological and geophysical information enables research at a new level. Furthermore, unlike results from past studies [2], this digital information is accessible to all interested researchers.

Investigations conducted from 2016 to 2023 revealed differences in the geodynamic setting between the eastern and western coasts of the Schmidt Peninsula. Horizontal shear regimes (shear type of deformation) predominate throughout this area. The western coast is characterized by a NW-trending orientation of the axis of maximum compression and its subhorizontal attitude. The eastern coast is characterized by horizontal extension regimes, typically localized in the axial parts of anticlinal structures. Directions of maximum compression are highly variable in this region. The parameters defining the stress-strained state of the Schmidt Peninsula differ significantly from those of the remainder of Sakhalin Island during the neotectonic period.

The central Sakhalin region exhibits a dominant subvertical orientation of the axis of maximum compression and a subhorizontal, most often submeridionally oriented axis of minimum compression (extension). Horizontal extension,

as a type of stress state, is characteristic of the entire central Sakhalin region. Horizontal compression and shear regimes are significantly more widespread in the western part of central Sakhalin. The number of horizontal extension regimes increases in the eastern and axial parts, approaching the Sea of Okhotsk.

Disruptive faults in the coal deposits of the western coast of Sakhalin Island are characterized by two, and less frequently three or four, density maxima on stereographic projections. Because most of the studied deposits are characterized by normal faults, fault elements whose bedding form each pair of maxima can be considered as conjugate.

A general pattern identified across all deposits is the nearly horizontal position of the extension axis, which is oriented sub-meridionally. A northerly to north-northeasterly trend of this axis is characteristic of the Lopatinskoe, Lesogorsk, Duysky, and Mgachi deposits, as well as a significant portion of the Ulegorsk and Boshnyakovo deposits; this abruptly changes to a sub-latitudinal trend in the southern Ulegorsk and Boshnyakovo deposits. The compression axis is oriented predominantly sub-latitudinally, with minor deviations in the southern and northern directions, and dip angles 30–70°.

Based on data from local stress states (LSS), the regional field of southern Sakhalin was reconstructed using the method of finding the “general”, or averaged, field of tectonic stresses [18]. Two LSS were reconstructed in five homogeneously-axed volumes, and three LSS in one homogeneously-axed volume; the averaged stress field was determined using 36 local compression and extension axes. Their localization on a stereogram allowed determination of the compression and extension cones and the regional stress field with the following characteristics (defining the principal stress axes and allowing calculation of the Lode–Nadai coefficient, though those specifics were not measured in this case): $\sigma_1 - 350^\circ \angle 10^\circ$; $\sigma_2 - 112^\circ \angle 66^\circ$; $\sigma_3 - 260^\circ \angle 20^\circ$; $\tau_{\max} - (-32^\circ \angle 83^\circ)$; $\tau_{\max} - 125^\circ \angle 68^\circ$.

Conclusion

This study provides a synthesis of key results from field tectonophysical investigations conducted during different years by various research groups at different times. The information on 264 observation points is presented in tabular format, containing crucial parameters of the stress-strained state of the Earth’s crust in Sakhalin. In contrast to the outcomes of previous studies and analogous works in other regions, our database is fully integrated with a GIS and managed using the Isoline GIS software suite.

Thus, unique regional tectonophysical information has been combined, generalized, and systematized, making it possible to leverage this information for both fundamental and purely applied purposes, such as evaluating the stability of wellbores, quarry walls, slopes, and other engineering challenges. This enables a qualitatively new level of field tectonophysical investigations in conjunction with other geological and geophysical data. The database, which documents the orientation of slickensides and the distribution of fracturing, allowing the inference of principal stress axes and calculation of the Lode–Nadai coefficient, is continually updated with new results from field observations and will be made publicly available on a dedicated page of the website of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

References

1. *Russian tectonophysics: In M.V. Gzovsky’s 100th Anniversary commemoration: Collected works.* **2019.** Apatity: FITS KNTS RAN, 359 p. (In Russ.).
2. Shpetalenko L.P., Chmikhailova T.P., Chaynikova M.V. **1976.** [*Atlas of tectonic structures of Sakhalin coal deposits*]. Yuzhno-Sakhalinsk: Far East Publ. Hous, 93 p. (In Russ.).
3. Kamenev P.A., Marinin A.V. **2023.** Reconstruction of paleostresses in the West of Sakhalin from tectonophysical research findings. *Journal of Mining*

- Science*, 59(6): 919–929. <https://doi.org/10.1134/S1062739123060054>
4. Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A. **2017**. Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(1): 181–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
 5. Rebetskiy Yu.L. **2007**. [*Tectonic stresses and strength of natural massifs*]. Moscow: Akademkniga, 406 p. (In Russ.).
 6. Tataurova A.A. **2015**. Stress and strain fields based on data on crustal earthquake mechanisms in Sakhalin Island. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 3(27): 93–101. (In Russ.).
 7. Sim L.A., Bogomolov L.M., Kuchai O.A., Tataurova A.A. **2017**. Neotectonic and modern stresses of South Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology*, 11(3): 223–235. <https://doi.org/10.1134/s1819714017030058>
 8. Sim L.A., Kamenev P.A., Bogomolov L.M. **2020**. New data on the latest stress state of the earth's crust on Sakhalin Island (based on structural and geomorphological indicators of tectonic stress). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 372–383. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383>
 9. Marinin A.V., Rebetskiy Yu.L., Sim L.A., Kamenev P.A., Kostrov Yu.V., Bondar I.V., Gordeev N.A., Degtyarev V.A. **2021**. Reconstruction of tectonic stresses on the Schmidt Peninsula, Sakhalin. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 4(52): 73–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-4-52-73-88>
 10. Kamenev P.A., Marinin A.V., Degtyarev V.A., Lukmanov A.R. Reconstruction of tectonic stresses of the Central Sakhalin. **2023**. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 57(1): 89–103. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/s1819714023080079>
 11. Kamenev P.A., Marinin A.V. **2024**. *Sakhalin Island tectonophysical database*: certificate of registration of the database: RU 2024623290, No. 2024623016 of 12.07.2024; publ. 24.07.2024, Bull. № 8.
 12. Sharueva L.I., Lopatin B.G., Roganov G.V. et al. (comp.) **2016**. [*State Geological map of Russian Federation on a scale of 1:1 000 000. Third generation. Far East series. Sheet N-54 (Nikolaevsk-na-Amure)*]: [Explanatory note]. Saint Petersburg: Kartograf. fabrika VSEGEI, 477 p. (In Russ.). URL: https://www.vsegei.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/Dalnevostochnaya/n-54.php
 13. Alenicheva A.A., Lizganov A.V., Ivanova V.V. et al. (comp.) **2019**. [*State Geological map of Russian Federation on a scale of 1:1 000 000. Third generation. Far East series. Sheet L-(53), 54 (Yuzhno-Sakhalinsk)*]: [Explanatory note]. St. Petersburg: Kartograf. fabrika VSEGEI, 536 p. (In Russ.). URL: https://www.vsegei.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/Dalnevostochnaya/l-53-54.php
 14. Richter A.V. **1986**. *The structure and tectonic development of Sakhalin in the Mesozoic*. Moscow: Nauka, 93 p. (Proceedings of the GIN RAS; Iss. 411). (In Russ.).
 15. Rastsvetaev L.M. **1987**. Paragenetic method of structural analysis of disjunctive tectonic faults. In: *Problems of structural geology and physics of tectonic processes*. Moscow: GIN AN SSSR, pt. 2: 173–235. (In Russ.).
 16. Gushchenko O.I. **1975**. The kinematic principle of reconstruction of the directions of the main stresses (according to geological and seismological data). *Doklady AN SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 225(3): 557–560. (In Russ.).
 17. Gzovsky M.V. **1975**. *Fundamentals of tectonophysics*. Moscow: Nauka, 535 p. (In Russ.).
 18. Sim L.A. **1982**. [Determination of the regional field from the data on local stresses on separate sites]. *Izvestia vuzov. Geologiya i razvedka = Geology and Exploration*, 4: 35–40. (In Russ.).
 19. Rebetskiy Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. **2017**. [*From slickensides to tectonic stresses. Methods and algorithms*]. Moscow: GEOS, 234 p. (In Russ.).
 20. Rebetskiy Yu.L., Sycheva N.A. **2024**. The stressed state of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region: reconstruction based on the modified algorithms of the cataclastic method. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 8(4): 261–276. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.4.261-276>
 21. Kamenev P.A., Degtyarev V.A., Zherdeva O.A., Kostrov Yu.V. **2024**. The fault kinematics of the Sakhalin Island based on geological and seismological methods. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 8(1): 37–46; <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.1.037-046>, URL: <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2024-1-3.pdf>
 22. Anisimov G.A., Valeeva S.E., Valeeva I.F., Anisimova L.Z. **2016**. About the current situation on the use of software systems in the mineral wealth use. *Exposition Oil & Gas*, 6(52): 13–15. (In Russ.).

APPENDIX / ПРИЛОЖЕНИЕ

Table 1. Parameters of the paleo-stress state in the area of the Sakhalin region (according to field research data of the authors and to published works during 1973–2023)

Таблица 1. Параметры палеонапряженного состояния территории о. Сахалин (по данным полевых исследований авторов и опубликованных источников за период с 1973 по 2023 г.)

No.	Observation point	Observation point coordinates		σ_1		σ_2		σ_3		Stress state type	μ_c	Bedding planes	Measurements	
		N	E	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle				N total	N used
1	21108	46°23.321'	143°20.470'	83	24	338	30	205	50	Hor.Ext.	0.1	-	13	12
2	21109	46°25.637'	143°19.826'	277	30	164	34	38	42	Hor.Ext.	0.02	-	8	6
3	21110	46°25.079'	143°19.956'	214	12	308	19	95	67	Hor.Ext.	-0.12	-	9	5
4	21111	46°17.852'	143°34.045'	114	12	205	1	297	78	Hor.Ext.	0.02	-	10	10
5	21112	46°17.836'	143°34.106'	277	30	185	3	90	60	Hor.Ext.	0.02	-	12	12
6	21113	46°17.127'	143°33.961'	121	18	30	4	288	72	Hor.Ext.	0.35	-	12	9
7	22133	46°49.218'	143°25.845'	239	12	148	7	28	76	Hor.Ext.	0.04	259 \angle 60	10	9
8	22134	46°44.459'	143°25.277'	165	19	73	6	326	71	Hor.Ext.	0.06	-	13	11
9	22135	46°52.702'	143°08.525'	112	34	202	1	293	56	Hor.Ext.	0.01	240 \angle 30	11	9
10	22136	46°52.372'	143°09.315'	176	4	354	86	86	0	Hor.Sh.	-0.07	-	13	10
11	22152	46°43.158'	143°30.508'	90	0	360	12	180	78	Hor.Ext.	-0.01	335 \angle 20	7	7
12	22153	46°43.342'	143°30.426'	342	25	251	4	153	65	Hor.Ext.	0.02	290 \angle 25	10	6
13	22154	46°43.569'	143°30.097'	78	12	280	77	169	5	Hor.Sh.	-0.05	80 \angle 30	10	10
14	22155	46°44.309'	143°29.747'	139	11	232	16	16	71	Hor.Ext.	0.32	90 \angle 70	9	9
15	22156	46°44.281'	143°26.445'	342	0	252	13	72	77	Hor.Ext.	0.01	-	10	10
16	22159	46°59.111'	143°04.332'	90	6	183	24	347	65	Hor.Ext.	-0.46	70 \angle 15	11	10
17	22160	46°30.045'	143°29.843'	84	0	354	12	174	78	Hor.Ext.	0.6	-	11	8
18	22161	46°31.653'	143°30.340'	103	18	235	65	7	18	Hor.Sh.	0.01	-	13	12
19	22162	46°32.122'	143°31.907'	283	18	191	4	90	72	Hor.Ext.	-0.05	-	13	11
20	22163	46°33.154'	143°31.851'	6	17	103	21	240	62	Hor.Ext.	0.27	-	10	6
21	22165	46°35.162'	143°30.798'	180	18	83	22	306	61	Hor.Ext.	0.13	-	10	10
22	22167	46°18.640'	143°22.765'	264	12	5	42	162	45	Hor.Ext.+Sh.	-0.33	-	8	7

No.	Observation point	Observation point coordinates		σ_1		σ_2		σ_3		Stress state type	μ_σ	Bedding planes	Measurements	
		N	E	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle				N total	N used
23	22168	46°19.306'	143°22.397'	90	36	203	28	321	41	Vert.Sh.	0.38	-	9	6
24	22185 A	46°03.941'	143°24.257'	246	6	337	8	120	80	Hor.Ext.	0.18	-	12	5
25	22185 B	46°03.941'	143°24.257'	276	0	6	86	186	4	Hor.Sh.	-0.3	-	12	7
26	22186	46°05.421'	143°24.012'	53	11	148	23	300	64	Hor.Ext.	-0.33	120 \angle 70	12	10
27	22189	46°08.736'	143°24.552'	246	6	338	16	136	73	Hor.Ext.	-0.11	-	10	10
28	22190	46°09.966'	143°25.029'	308	17	126	73	218	1	Hor.Sh.	-0.05	-	11	10
29	22191	46°11.048'	143°25.346'	202	21	107	13	346	65	Hor.Ext.	0	-	14	13
30	22192	46°11.714'	143°25.476'	248	34	7	36	129	36	Hor.Ext.+Sh.	-0.14	-	9	8
31	22193	46°12.124'	143°25.439'	292	34	37	21	153	48	Hor.Ext.	0.54	-	8	7
32	22194	46°12.722'	143°25.309'	284	29	188	11	79	58	Hor.Ext.	-0.24	-	9	9
33	22195	46°06.984'	141°55.250'	11	5	280	19	114	71	Hor.Ext.	0.02	-	8	8
34	22196	46°06.993'	141°55.315'	244	23	336	5	76	66	Hor.Ext.	-0.32	-	9	8
35	22197	46°02.751'	141°54.939'	153	63	275	15	11	22	Hor.Comp.	0	-	11	10
36	22206	46°38.473'	143°08.220'	308	17	206	34	59	51	Hor.Ext.	-0.33	-	10	8
37	22207	46°37.199'	143°08.306'	136	22	261	55	35	26	Hor.Sh.	0.29	-	14	13
38	23209	46°43.905'	142°44.130'	284	29	181	22	59	52	Hor.Ext.	-0.11	190 \angle 20	10	9
39	23210	46°51.346'	142°49.002'	354	17	174	73	264	0	Hor.Sh.	-0.07	270 \angle 20	12	12
40	23211	46°40.629'	142°45.948'	66	6	159	30	326	60	Hor.Ext.	-0.09	280 \angle 10	10	10
41	23212	46°27.626'	143°33.337'	138	6	232	34	40	55	Hor.Ext.	-0.03	-	10	10
42	23213	46°27.372'	143°33.217'	250	23	153	17	30	61	Hor.Ext.	-0.24	-	8	7
43	23214	46°27.215'	143°33.289'	96	6	188	17	348	72	Hor.Ext.	-0.05	-	8	8
44	23215	46°26.351'	143°33.911'	318	6	227	9	80	80	Hor.Ext.	0.21	-	8	7
45	23216 A	46°47.125'	143°11.403'	174	29	54	42	286	34	Hor.Sh.	0.26	-	9	4
46	23216 B	46°47.125'	143°11.403'	264	6	171	23	8	66	Hor.Ext.	-0.31	-	9	4
47	23218	46°35.872'	143°03.362'	6	0	276	12	96	78	Hor.Ext.	-0.32	-	12	12

No.	Observation point	Observation point coordinates		σ_1		σ_2		σ_3		Stress state type	μ_o	Bedding planes	Measurements	
		N	E	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle				N total	N used
48	23219 A	46°35.937'	143°03.449'	66	40	325	13	220	47	Vert.Sh.	0.56	-	11	7
49	23219 B	46°35.937'	143°03.449'	18	0	108	0	270	90	Hor.Ext.	0.14	-	11	4
50	23220 A	46°36.521'	143°19.384'	264	12	161	46	5	42	Hor.Ext.+Sh.	0.02	-	16	6
51	23220 B	46°36.521'	143°19.384'	24	0	114	0	270	90	Hor.Ext.	0.13	-	16	10
52	23221	46°41.937'	143°28.174'	341	15	247	14	115	69	Hor.Ext.	0.51	-	10	10
53	23222 A	46°39.869'	143°29.928'	249	28	344	9	90	60	Hor.Ext.	-0.05	-	8	3
54	23222 B	46°39.869'	143°29.928'	146	36	237	1	328	54	Vert.Sh.	-0.41	-	8	5
55	23223	46°40.926'	143°29.763'	264	12	359	25	150	62	Hor.Ext.	0.35	-	10	7
56	23224	46°41.290'	143°29.841'	42	0	132	0	270	90	Hor.Ext.	-0.04	-	7	7
57	23225	46°41.815'	143°28.462'	323	21	213	41	73	41	Hor.Ext.+Sh.	-0.36	-	8	8
58	23226	46°48.437'	143°25.712'	211	30	318	27	81	48	Hor.Ext.	0.03	210 \angle 60	11	9
59	23227	46°48.655'	143°26.544'	108	11	206	33	2	54	Hor.Ext.	0.17	260 \angle 40	10	10
60	23228	46°36.778'	142°58.918'	257	23	129	55	358	25	Hor.Sh.	0.03	-	10	10
61	23229	46°37.091'	142°56.477'	252	11	156	28	2	60	Hor.Ext.	-0.04	260 \angle 40	12	12
62	23230	46°36.591'	142°59.978'	288	47	142	38	38	18	Hor.Comp.+Sh.	0.47	-	8	7
63	23231	46°37.507'	142°52.332'	114	6	205	11	356	78	Hor.Ext.	0.13	-	10	10
64	23232	46°37.411'	142°52.006'	90	36	360	0	270	54	Vert.Sh.	-0.05	-	7	6
65	23233	46°37.361'	142°51.462'	115	12	213	34	8	53	Hor.Ext.	-0.39	-	7	7
66	20060	50°05.563'	143°44.308'	167	27	66	21	304	54	Hor.Ext.	0.04	329 \angle 10	8	8
67	20061	50°05.644'	143°44.541'	146	26	54	4	317	64	Hor.Ext.	0.42	334 \angle 10	9	9
68	20062	50°05.724'	143°44.634'	131	27	232	19	353	55	Hor.Ext.	-0.01	284 \angle 12	7	7
69	20066	50°08.174'	143°51.883'	349	21	246	29	110	52	Hor.Ext.	-0.01	214 \angle 50	8	8
70	20068	50°03.654'	143°41.660'	202	10	72	74	294	12	Hor.Sh.	0.01	204 \angle 10	7	5
71	20072	46°28.449'	141°49.797'	180	12	280	41	77	47	Hor.Ext.+Sh.	0.11	64 \angle 30	6	5
72	20073	46°35.385'	141°48.781'	258	12	348	2	90	78	Hor.Ext.	-0.05	-	10	10

No.	Observation point	Observation point coordinates		σ_1		σ_2		σ_3		Stress state type	μ_σ	Bedding planes	Measurements	
		N	E	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle				N total	N used
73	20074	46°36.318'	141°51.125'	126	6	33	28	226	61	Hor.Ext.	-0.13	-	9	4
74	21075	48°21.340'	142°38.755'	108	6	6	65	201	24	Hor.Sh	-0.03	79 \angle 70	14	13
75	21076	48°21.861'	142°39.490'	258	6	167	10	17	78	Hor.Ext.	0.03	109 \angle 70	12	9
76	21077	48°35.008'	142°41.559'	276	0	6	18	186	72	Hor.Ext.	0.11	89 \angle 75	6	4
77	21078	48°34.602'	142°43.104'	216	6	316	60	122	29	Hor.Sh	0.08	79 \angle 70	12	10
78	21079	48°38.185'	142°45.962'	245	18	153	5	46	71	Hor.Ext.	0.16	-	11	8
79	21080	48°38.089'	142°45.920'	110	23	16	7	270	66	Hor.Ext.	0.08	-	12	12
80	21081	48°20.857'	142°39.987'	102	12	196	16	337	70	Hor.Ext.	-0.37	-	8	7
81	21083	49°14.159'	142°05.091'	288	11	21	15	162	71	Hor.Ext.	0.13	-	10	8
82	21084	49°14.211'	142°05.106'	251	17	136	54	351	30	Hor.Sh	0.14	-	10	5
83	21086	49°38.715'	142°09.828'	78	0	168	50	348	40	Hor.Ext.+Sh.	-0.3	71 \angle 80	10	8
84	21087	49°38.802'	142°09.305'	203	5	112	16	311	74	Hor.Ext.	-0.45	-	8	7
85	21088	49°29.997'	142°08.493'	318	5	226	26	59	64	Hor.Ext.	0.01	-	9	6
86	21089	49°26.968'	142°08.192'	205	16	301	18	76	65	Hor.Ext.	0.29	-	11	9
87	21091	49°16.268'	142°04.580'	188	8	287	46	91	42	Hor.Ext.+Sh.	-0.1	-	8	6
88	21092	49°10.866'	142°04.018'	258	12	167	3	62	78	Hor.Ext.	0.1	224 \angle 15	10	10
89	21093	50°47.927'	142°09.546'	69.4	28.4	335	8	231	60	Hor.Ext.	0.03	-	8	8
90	21094	50°47.597'	142°08.744'	356	4	264	24	95	66	Hor.Ext.	0.23	-	8	8
91	21095	50°49.300'	142°05.214'	83.1	29.8	345.8	12.5	235.7	57.2	Hor.Ext.	0.38	-	13	10
92	21096	50°49.370'	142°05.416'	348	28	127	56	247	19	Hor.Sh	-0.09	-	9	5
93	21097	50°50.872'	142°06.647'	306	6	48	63	214	26	Hor.Sh	0.18	-	15	10
94	21098	50°53.579'	142°07.202'	77	18	169	4	270	72	Hor.Ext.	-0.39	265 \angle 80	12	6
95	21099	51°06.044'	142°15.267'	294	0	24	41	204	49	Hor.Ext.+Sh.	-0.24	-	9	9
96	21100	51°14.853'	143°15.854'	306	6	216	4	94	83	Hor.Ext.	-0.05	250 \angle 45	10	7
97	21101	51°15.078'	143°15.927'	252	6	157	42	348	48	Hor.Ext.+Sh.	0.28	-	10	8

No.	Observation point	Observation point coordinates		σ_1		σ_2		σ_3		Stress state type	μ_o	Bedding planes	Measurements	
		N	E	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle				N total	N used
98	21102	51°15.576'	143°11.999'	180	60	312	21	50	20	Hor.Comp.	-0.41	-	8	5
99	21103	51°13.150'	143°09.459'	282	0	192	31	12	59	Hor.Ext.	0.07	-	12	11
100	21104	51°25.073'	142°46.674'	142	42	7	38	256	24	Hor.Ext.+Sh.	-0.05	-	10	7
101	21106	50°28.733'	142°39.080'	62	63	193	18	290	19	Hor.Comp.	0.05	-	10	7
102	21107	50°28.692'	142°39.084'	229	27	48	63	138	0	Hor.Sh	-0.13	-	8	8
103	21114	50°02.152'	143°35.603'	185	11	90	24	298	63	Hor.Ext.	-0.07	-	11	10
104	21115	50°02.067'	143°32.357'	120	6	214	32	21	57	Hor.Ext.	-0.24	239 \angle 40	13	12
105	21116	50°01.909'	143°30.383'	216	6	306	5	75	82	Hor.Ext.	0.12	-	9	9
106	21117	50°01.245'	143°28.148'	199	15	293	14	65	69	Hor.Ext.	0.3	229 \angle 60	10	10
107	21118	50°01.336'	143°27.169'	289	71	158	13	65	14	Hor.Comp.	-0.48	-	10	9
108	21119	50°00.951'	143°25.257'	47	11	138	4	246	78	Hor.Ext.	-0.06	-	10	10
109	21120	49°57.087'	143°21.995'	161	15	264	40	55	46	Hor.Ext.+Sh.	0.28	-	11	7
110	21121	49°57.153'	143°23.389'	206	16	299	13	66	69	Hor.Ext.	0.05	-	11	8
111	21122	49°57.249'	143°22.181'	282	12	192	2	90	78	Hor.Ext.	-0.08	-	9	8
112	21123	50°01.715'	143°21.344'	162	25	71	4	333	65	Hor.Ext.	0.04	-	9	7
113	21124	50°01.715'	143°21.344'	270	12	7	29	160	58	Hor.Ext.	0.33	-	8	8
114	21125	48°57.868'	142°58.690'	36	6	300	44	132	46	Hor.Ext.+Sh.	-0.13	220 \angle 20	11	9
115	21126	48°58.014'	142°58.714'	110	23	19	2	284	67	Hor.Ext.	0.27	-	9	7
116	21129	47°52.498'	142°29.129'	66	6	334	16	175	73	Hor.Ext.	0.32	-	14	11
117	21130	47°07.371'	142°03.787'	276	18	173	36	28	49	Hor.Ext.+Sh.	-0.16	-	7	5
118	21131	47°10.191'	142°05.535'	9	9	260	65	102	24	Hor.Sh	-0.05	15 \angle 30	7	7
119	21137	46°25.564'	141°52.433'	48	0	138	45	318	46	Hor.Ext.+Sh.	-0.27	90 \angle 15	14	10
120	21138	46°26.270'	141°52.603'	336	0	246	72	66	18	Hor.Sh	0.1	98 \angle 15	13	13
121	21139	46°26.161'	141°56.009'	174	23	268	8	14	65	Hor.Ext.	0.2	240 \angle 85	11	11
122	21140	47°02.456'	142°33.479'	60	6	329	5	199	82	Hor.Ext.	-0.01	-	15	11

No.	Observation point	Observation point coordinates		σ_1		σ_2		σ_3		Stress state type	μ_σ	Bedding planes	Measurements	
		N	E	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle				N total	N used
123	22140-2	47°01.825'	142°27.015'	200	31	98	19	341	53	Hor.Ext.	0.21	–	14	7
124	22141	47°01.872'	142°30.020'	4	4	270	42	99	48	Hor.Ext.+Sh.	0.19	300 \angle 10	13	9
125	22142	47°02.019'	142°30.645'	338	10	237	48	77	40	Hor.Ext.+Sh.	-0.08	75 \angle 20	6	5
126	22144	49°34.865'	142°11.18'	152	11	46	54	249	34	Hor.Sh	0.18	219 \angle 80	12	7
127	22145	49°09.477'	142°09.486'	270	72	121	16	29	9	Hor.Comp.	-0.12	–	12	10
128	22146	49°40.071'	142°17.286'	338	21	79	26	215	56	Hor.Ext.	-0.34	–	14	12
129	22147	49°42.623'	142°09.451'	195	11	46	78	286	6	Hor.Sh	-0.13	–	15	14
130	22148	49°31.386'	142°09.158'	283	18	15	8	127	71	Hor.Ext.	-0.52	–	13	11
131	22149	49°31.026'	142°08.947'	283	18	191	4	90	72	Hor.Ext.	0.14	–	9	6
132	22150	49°20.126'	142°04.568'	11	5	260	77	102	12	Hor.Sh	-0.36	–	8	6
133	22157	47°00.187'	142°15.088'	31	30	296	8	192	58	Hor.Ext.	0.01	215 \angle 10	11	11
134	22158	46°57.909'	142°12.941'	120	6	210	2	320	84	Hor.Ext.	0.16	110 \angle 50	7	7
135	22170	49°42.631'	142°39.657'	60	6	156	47	324	42	Hor.Ext.+Sh.	-0.49	340 \angle 25	12	7
136	22171	49°41.584'	142°35.139'	157	5	249	27	56	63	Hor.Ext.	0.35	290 \angle 60	8	8
137	22172	49°49.256'	142°24.513'	284	29	150	51	28	23	Hor.Sh	-0.17	250 \angle 70	12	12
138	22173	50°01.859'	142°11.819'	360	6	91	12	244	77	Hor.Ext.	0.1	70 \angle 75	13	12
139	22174	50°01.209'	142°08.554'	11	5	109	60	279	30	Hor.Sh	-0.11	–	10	9
140	22175	50°02.437'	142°10.063'	47	11	309	34	152	53	Hor.Ext.	0.1	–	10	10
141	22176	50°02.822'	142°10.643'	285	65	102	25	192	1	Hor.Comp.	0.01	–	12	12
142	22177	50°03.076'	142°10.297'	186	17	92	13	327	69	Hor.Ext.	0	–	11	10
143	22178	49°51.517'	142°22.917'	187	42	285	9	25	47	Vert.Sh.	0.11	–	8	8
144	22179	50°15.851'	142°29.559'	355	11	87	7	207	77	Hor.Ext.	-0.02	80 \angle 85	12	11
145	22182	50°23.681'	142°21.155'	310	51	70	22	174	30	Hor.Comp.	0.02	255 \angle 75	8	8
146	22183	49°56.017'	143°12.834'	360	6	262	53	94	36	Hor.Ext.+Sh.	0.01	–	11	11
147	22184	49°56.036'	143°12.817'	68	34	309	36	187	36	Hor.Ext.+Sh.	-0.03	–	9	8

No.	Observation point	Observation point coordinates		σ_1		σ_2		σ_3		Stress state type	μ_o	Bedding planes	Measurements	
		N	E	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle				N total	N used
148	22205	50°28.754'	142°38.860'	111	28	215	25	340	50	Hor.Ext.	0.06	-	10	7
149	20277	54°05.702'	142°30.041'	42	37	209	52	307	7	Hor.Comp.+Sh.	0.1	-	11	10
150	20769	54°04.954'	142°31.011'	185	11	80	52	283	36	Hor.Ext.+Sh.	0.18	248 \angle 62	16	10
151	20272m	54°04.894'	142°31.093'	255	35	72	55	164	2	Hor.Sh	0.22	248 \angle 60	6	4
152	20272g	54°04.887'	142°31.079'	36	0	126	73	306	17	Hor.Sh	-0.05	-	15	10
153	20767m	54°04.879'	142°31.106'	231	22	355	54	129	26	Hor.Sh	-0.56	258 \angle 50	11	10
154	20767k	54°04.879'	142°31.106'	270	42	56	43	163	18	Hor.Ext.+Sh.	-0.08	258 \angle 50	12	10
155	20766m	54°04.856'	142°31.123'	277	30	122	58	13	11	Hor.Sh	-0.22	248 \angle 55	12	11
156	20766k	54°04.856'	142°31.123'	54	6	321	27	155	63	Hor.Ext.	-0.03	248 \angle 55	8	8
157	20279	54°04.787'	142°31.196'	171	53	44	24	302	26	Hor.Comp.	0.41	300 \angle 0	13	6
158	20281	54°04.728'	142°31.236'	210	6	306	50	115	40	Hor.Ext.+Sh.	0.14	240 \angle 44	7	4
159	20280	54°04.718'	142°31.250'	231	22	24	66	137	10	Hor.Sh	0.35	230 \angle 56	7	5
160	20771	54°04.699'	142°31.240'	212	17	357	69	119	11	Hor.Sh	0.21	235 \angle 44	14	11
161	20278	54°04.695'	142°31.241'	202	21	39	68	294	6	Hor.Sh	0.29	228 \angle 51	4	3
162	20812	54°04.672'	142°31.273'	288	6	21	30	189	59	Hor.Ext.	-0.39	228 \angle 40	8	7
163	20282	54°04.666'	142°31.280'	62	29	201	54	321	20	Hor.Sh	0.12	-	9	6
164	20773	54°04.625'	142°31.301'	31	30	200	59	298	5	Hor.Sh	0.15	243 \angle 46	10	10
165	20774	54°04.505'	142°31.397'	68	34	246	56	338	1	Hor.Sh	-0.24	248 \angle 50	6	6
166	20775	54°04.364'	142°31.505'	186	17	6	73	276	0	Hor.Sh	-0.12	238 \angle 60	16	10
167	20287	54°04.061'	142°31.775'	26	77	230	12	138	5	Hor.Comp.	-0.5	-	7	5
168	20292	54°02.955'	142°33.447'	174	17	268	13	33	69	Hor.Ext.	0.46	245 \angle 35	5	3
169	20291	54°02.931'	142°33.476'	315	82	210	2	120	8	Hor.Comp.	0.22	-	11	9
170	20782	54°02.927'	142°33.474'	270	90	234	0	324	0	Hor.Comp.	0.06	240 \angle 21	24	20
171	20293k	54°02.800'	142°33.700'	44	66	249	32	152	0	Hor.Comp.	-0.13	-	11	9
172	20293g	54°02.801'	142°33.690'	90	78	348	3	258	0	Hor.Comp.	-0.19	239 \angle 21	10	10

No.	Observation point	Observation point coordinates		σ_1		σ_2		σ_3		Stress state type	μ_σ	Bedding planes	Measurements	
		N	E	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle				N total	N used
173	20294	54°02.359'	142°34.245'	109	71	228	10	321	0	Hor.Comp.	0.18	230 \angle 23	17	11
174	20295	54°02.224'	142°34.286'	233	11	27	78	142	0	Hor.Sh	-0.05	233 \angle 33	7	6
175	20784	54°02.009'	142°34.399'	307	11	216	2	115	0	Hor.Ext.	-0.21	238 \angle 35	12	10
176	20297	54°01.988'	142°34.417'	262	42	49	43	156	0	Hor.Comp.+Sh.	-0.12	216 \angle 26	12	7
177	20785	54°01.935'	142°34.455'	338	57	209	22	109	0	Hor.Comp.	0.14	233 \angle 38	12	11
178	20789	54°00.980'	142°35.641'	90	36	270	54	0	0	Hor.Comp.+Sh.	0.38	-	5	4
179	20791	54°00.211'	142°36.772'	270	48	74	41	171	0	Hor.Comp.+Sh.	0.17	198 \angle 30	5	4
180	20816m	54°01.818'	142°58.375'	300	6	34	32	201	57	Hor.Ext.	-0.46	-	9	9
181	20816b	54°01.818'	142°58.375'	141	16	273	67	46	17	Hor.Sh,	0.2	-	18	11
182	20819 и 20820	54°01.450'	142°57.457'	264	12	66	78	173	4	Hor.Sh,	-0.15	68 \angle 48	11	8
183	20821	54°01.328'	142°57.270'	108	6	15	27	209	63	Hor.Ext.	-0.03	13 \angle 40	11	8
184	20822	54°01.217'	142°57.155'	206	77	310	3	41	13	Hor.Comp.	0.12	228 \angle 60	12	8
185	20823 и 20824	54°01.170'	142°57.023'	209	22	103	35	325	47	Hor.Ext.	-0.25	128 \angle 45	7	5
186	20326	54°01.058'	142°56.815'	189	9	92	36	290	52	Hor.Ext.+Sh.	0.25	-	14	10
187	20327	54°01.015'	142°56.746'	218	42	18	47	119	10	Hor.Comp.+Sh.	0.25	313 \angle 25	9	5
188	20328	54°00.955'	142°56.551'	138	37	3	43	248	25	Hor.Comp.+Sh.	0.11	218 \angle 37	13	6
189	20330	54°00.541'	142°56.117'	233	11	54	79	323	0	Hor.Sh	-0.1	58 \angle 61	12	10
190	20331	54°00.514'	142°56.136'	246	6	153	3	346	60	Hor.Ext.	-0.18	28 \angle 75	16	15
191	20826	54°00.505'	142°56.089'	240	35	46	54	146	7	Hor.Sh	0.05	203 \angle 55	24	13
192	20827	54°00.485'	142°56.048'	0	0	270	90	90	0	Hor.Sh	0.18	63 \angle 35	10	5
193	20830	54°00.427'	142°55.879'	270	72	53	15	145	11	Hor.Comp.	0.45	38 \angle 35	9	4
194	20831	54°00.364'	142°55.745'	233	11	140	14	0	72	Hor.Ext.	-0.07	118 \angle 24	13	11
195	20832	54°00.140'	142°55.535'	262	42	49	43	156	17	Hor.Comp.+Sh.	0.11	178 \angle 25	14	12
196	20835	53°59.897'	142°55.006'	279	48	76	40	176	12	Hor.Comp.+Sh.	-0.32	243 \angle 52	16	14

No.	Observation point	Observation point coordinates		σ_1		σ_2		σ_3		Stress state type	μ_o	Bedding planes	Measurements	
		N	E	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle				N total	N used
197	20337	53°59.891'	142°55.004'	41	11	297	51	139	37	Hor.Ext.+Sh.	0.08	59 \angle 57	9	8
198	20341	53°59.542'	142°54.595'	64	23	164	22	292	57	Hor.Ext.	-0.27	-	10	9
199	20342	53°59.475'	142°54.515'	249	28	137	36	8	41	Hor.Ext.+Sh.	-0.12	100 \angle 26	10	6
200	20838	53°59.424'	142°54.467'	60	0	330	50	150	40	Hor.Ext.+Sh.	-0.04	48 \angle 75	8	5
201	20842	53°59.281'	142°54.385'	246	6	343	49	151	40	Hor.Ext.+Sh.	0.1	38 \angle 70	6	6
202	20843	53°59.250'	142°54.362'	38	42	131	3	225	48	Vert.Sh.	-0.42	62 \angle 60	11	7
203	20841	53°59.108'	142°54.257'	66	6	157	10	307	78	Hor.Ext.	-0.07	218 \angle 52	11	9
204	20345	53°59.095'	142°54.268'	108	6	215	71	16	19	Hor.Sh.	0.12	70 \angle 75	10	7
205	20846	53°58.354'	142°53.879'	257	18	134	60	355	23	Hor.Sh.	0.14	208 \angle 55	12	8
206	20847	53°58.141'	142°53.810'	206	49	73	31	327	24	Hor.Comp.	-0.27	-	7	5
207	20809k	53°58.104'	142°53.797'	51	22	171	51	307	30	Hor.Sh.	0.43	33 \angle 45	11	7
208	20809g	53°58.104'	142°53.797'	270	24	104	65	358	8	Hor.Sh.	-0.13	53 \angle 33	7	6
209	20809b	53°58.104'	142°53.797'	47	11	202	78	316	5	Hor.Sh.	0.45	28 \angle 42	5	4
210	20807	53°57.629'	142°53.617'	157	5	66	6	290	82	Hor.Ext.	0.06	-	14	11
211	20806	53°57.606'	142°53.601'	123	24	18	31	244	49	Hor.Ext.	0.29	249 \angle 76	12	7
212	20805	53°57.575'	142°53.596'	52	17	166	53	312	32	Hor.Sh.	-0.31	258 \angle 50	11	7

Notes. The table shows the number and coordinates of the observation points; the orientation of the principal stress axes (σ_1 – minimum (extension); σ_2 , intermediate; σ_3 , maximum compressive stresses) reconstructed using the cataclastic method [5] according to structural and kinematic data on the slickensides and joints; type of the stress state (Hor.Ext., horizontal extension; Hor.Ext.+Sh., horizontal extension with shear; Hor.Sh., horizontal shear; Hor.Comp., horizontal compression; Hor.Comp.+Sh., horizontal compression with shear; Vert.Sh., vertical shear); the Lode–Nadai coefficient μ_o ; bedding plane dip; the total number of measurements at the point and used for calculation in the STRESSgeol software. Dash denotes that no data available.

Примечания. В таблице приведены номер и координаты точек наблюдения; ориентировки осей главных напряжений (σ_1 – минимальных (растяжение), σ_2 – промежуточных и σ_3 – максимальных сжимающих напряжений), реконструированные при помощи катакластического метода [5] по структурно-кинематическим данным о зеркалах скольжения и трещинах; тип (обстановка) напряженного состояния (Hor.Ext. – горизонтальное растяжение, Hor.Ext.+Sh. – горизонтальное растяжение в сочетании со сдвигом, Hor.Sh. – горизонтальное сжатие, Hor.Comp. – горизонтальное сжатие, Hor.Comp.+Sh. – горизонтальное сжатие в сочетании со сдвигом, Vert.Sh. – сдвиг в вертикальной плоскости); коэффициент Лодэ–Надаи μ_o ; элементы залегания слоистости; общее количество замеров в точке и использованных для расчета в программе STRESSgeol. Прочерк – данные отсутствуют.

Table 2. Information on orientation of principal stress axes for observation points No. 213–264 (according to [2–4, 7, 8])
Таблица 2. Сведения об ориентировке осей главных напряжений для точек наблюдения 213–264 (по данным [2–4, 7, 8])

No.	Observation point	Coordinates or location of observation point		σ_1		σ_2		σ_3	
		N	E	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle
213	1	47°01.450'	142°48.217'	6	20	106	25	243	56
214	2a	46°39.483'	141°50.950'	202	20	356	67	110	9
215	2b	Nevelsk, northern suburb and southern part of marine terrace		356	67	202	20	108	10
216	3	46°44.667'	142°07.017'	162	30	21	55	264	18
217	4	46°51.133'	142°59.500'	34	10	130	32	288	54
218	5	Lytoga River, near the bridge up of the village of Ogon'ki		18	10	271	68	112	20
219	6a	46°46.800'	142°28.433'	176	36	65	28	306	40
220	6b	Center of the quarry near the settlement of Petropavlovskoe, old field		65	30	176	32	302	43
221	7	The entrance to the Petropavlovskiy quarry		330	50	196	30	90	20
222	8	46°37.033'	142°58.133'	132	23	343	65	227	10
223	9	Mt. Yunona		208	10	345	75	118	10
224	10	Town of Korsakov, rocky wall		314	30	176	52	58	30
225	11	48°00.167'	142°31.250'	210	5	116	50	304	40
226	12a	47°06.220'	142°36.910'	320	40	228	2	134	50
227	12b	The left bank of the Susuya river to the south of the Sanatorny village		159	35	35	38	274	30
228	13	46°40.973'	143°27.212'	82	10	218	74	348	10
229	14a	46°38.278'	143°30.705'	347	30	182	56	80	5
230	14b	Cape Pritchiy by the Sea of Okhotsk		322	20	64	26	195	55
231	14c	Cape Pritchiy by the Sea of Okhotsk		20	20	150	60	280	20
232	15	46°39.353'	143°28.685'	152	10	246	18	34	68
233	16	46°46.743'	142°28.975'	188	5	293	64	97	24
234	17a	The left bank of the river Tsunai under the bridge on the highway Yuzhno-Sakhalinsk–Kholmsk		16	15	116	26	254	56

No.	Observation point	Coordinates or location of observation point		σ_1		σ_2		σ_3	
		N	E	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle	Dip Az	\angle
235	18	47°22.585'	141°59.883'	152	30	20	50	255	26
236	19	The shore of the Tatar Strait, Simakovo village, cut into the road		318	10	54	21	204	61
237	20	47°03.502'	142°07.025'	52	15	322	0	237	70
238	21a	Yuzhno-Sokolovsky quarry, young field		256	70	40	18	132	12
239	21b	Yuzhno-Sokolovsky quarry, old field		42	18	260	70	130	12
240	22	Yuzhno-Sokolovsky quarry, foot wall of the fault		268	70	130	12	36	10
241	23	Ilyinsky village, the left bank of the Jasminka river		319	30	104	53	216	18
242	24	Ilyinsky village, right bank of the Jasminka river		206	25	94	40	320	40
243	25	47°57.230'	142°20.988'	306	3	216	74	38	14
244	26	Northern outskirts of the village of Vzmorye		234	60	26	16	122	10
245	27	46°43.600'	142°26.917'	145	10	297	76	53	5
246	28a	46°53.133'	142°20.988'	155	20	359	56	250	10
247	28b	Izvestkovy quarry, old field		92	42	194	14	300	45
248	29	Izvestkovy quarry, eastern wall		144	47	3	35	256	20
249	Due deposit			195	5	100	60	295	60
250	Lopatinskoe deposit (Dolinskaya mine)			215	5	315	25	120	30
251	Mgachi deposit (west wing)			215	5	125	60	305	30
252	Mgachi deposit (east wing)			0	5	270	60	90	35
253	Boshnyakovo deposit (west wing)			240	20	45	70	150	10
254	Boshnyakovo deposit (east wing)			5	5	275	60	100	25
255	Boshnyakovo deposit (southern centroclinal)			270	5	175	70	5	20
256	Boshnyakovo deposit (northern centroclinal)			25	10	290	5	150	80
257	Lesogorsk deposit (Telnovskaya mine)			335	10	65	20	225	70
258	Lesogorsk deposit (Upper Telnovskaya 1)			20	5	280	25	110	25
259	Lesogorsk deposit (Upper Telnovskaya 2)			225	5	315	15	130	70
260	Uglegorsk deposit (Sergeevsky site)			180	30	20	40	280	5

No.	Observation point	Coordinates or location of observation point		σ_1		σ_2		σ_3	
		N	E	Dip Az	∠	Dip Az	∠	Dip Az	∠
261	Uglegorsk deposit (Uglegorsk 6 mine)			150	5	240	40	50	55
262	Uglegorsk deposit (Uglegorsk 4-1 mine)			320	20	220	30	75	50
263	Uglegorsk deposit (Uglegorsk 4-2 mine)			220	50	40	40	130	0
264	Uglegorsk deposit (Udarnovskaya mine)			240	50	25	30	125	20

Note. The orientation of the principal stress axes: σ_1 , minimum (extension); σ_2 , intermediate; σ_3 , maximum compressive stresses.

Примечание. Ориентировка осей главных напряжений: σ_1 – минимальных (растяжение), σ_2 – промежуточных и σ_3 – максимальных сжимающих напряжений.

About the Authors

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

Marinin, Anton V. (<https://orcid.org/0000-0002-1099-6492>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Lead Researcher, Laboratory fundamental and applied problems of tectonophysics, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, marinin@ifz.ru

Sim, Lydia A. (<https://orcid.org/0000-0003-0267-2241>), Doctor of Geology and Mineralogy, Lead Researcher, Laboratory of fundamental and applied problems of tectonophysics, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, sim@ifz.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, Russia, bleom@mail.ru

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

Degtyarev, Vladislav A. (<https://orcid.org/0000-0001-8922-3654>), Researcher, Laboratory of geochemistry and regional geology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, degtyarevvladislav96@yandex.ru

Received 16 January 2025

Accepted 23 February 2025

Об авторах

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

Маринин Антон Витальевич (<https://orcid.org/0000-0002-1099-6492>), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, marinin@ifz.ru

Сим Лидия Андреевна (<https://orcid.org/0000-0003-0267-2241>), доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, sim@ifz.ru

Богомолов Леонид Михайлович (<https://orcid.org/0000-0002-9124-9797>), доктор физико-математических наук, директор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, bleom@mail.ru

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

Дегтярев Владислав Анатольевич (<https://orcid.org/0000-0001-8922-3654>), научный сотрудник лаборатории геохимии и региональной геологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, degtyarevvladislav96@yandex.ru

Поступила 16.01.2025

Принята к публикации 23.02.2025

© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.344.42+551.466.62

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.1.056-065>
<https://www.elibrary.ru/kktwzl>

Assessment of the tsunami in the Pacific Ocean caused by the explosion of the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano on January 15, 2022, using the express method of operational forecasting*

Yury P. Korolev[@], Pavel Yu. Korolev

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

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

Abstract. The aim of the study was to confirm the possibility of forecasting tsunamis of non-seismic (volcanic) origin using the express method of operational forecasting. The surface wave formed as a result of the explosive volcanic eruption on January 15, 2022 was a superposition of forced (baric) waves caused by an atmospheric pressure wave and free (gravity) waves generated by the disintegration of the disturbance in the source. The express method of operational tsunami forecasting was used to compute the gravitational component of the surface wave. The method allows one to compute the tsunami waveform at any point in the ocean and near the coast in real time based on the data from the sea level measurement stations. The computation of the tsunami on 15.01.2022, its gravitational component, at the DART stations remote from the source was performed based on the data from the DART stations 51425 and 52406 closest to the volcano. For an adequate forecast, the information on the tsunami of the DART stations closest to the source with the duration of a quarter of the first period is sufficient, which is especially important in the operational mode. The result satisfies the definition of the concept of “tsunami forecast” formulated by the Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. It has been confirmed that the express method can provide a tsunami forecast regardless of the mechanism of its excitation. It remains unclear how adequate the assessment of the amplitude of surface waves is based on the bottom pressure data is.

Keywords: tsunami, operational tsunami forecast, tsunami warning services, Pacific Ocean, sea level measurements, Lamb waves, forced waves, free waves

Оценка цунами в Тихом океане, вызванного взрывом вулкана Хунга Тонга–Хунга Хаапай 15 января 2022 г., экспресс-методом оперативного прогноза

Ю. П. Королёв[@], П. Ю. Королев

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

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

Резюме. Целью работы являлось подтверждение возможности прогнозирования цунами несейсмического (вулканического) происхождения экспресс-методом оперативного прогноза. Образовавшаяся в результате взрывного извержения вулкана 15.01.2022 поверхностная волна представляла собой суперпозицию вынужденных (барических) волн, вызванных волной атмосферного давления, и свободных (гравитационных) волн, генерированных распадом возмущения в очаге. Для расчета гравитационной составляющей поверхностной

* The translation from Russian: Королев Ю.П., Королев П.Ю. Оценка цунами в Тихом океане, вызванного взрывом вулкана Хунга Тонга–Хунга Хаапай 15 января 2022 г., экспресс-методом оперативного прогноза. [Electronic resource]. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 1. <http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-1-4.pdf>; <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.1.056-065>. Translated by Yury P. Korolev.

Полный текст статьи на русском языке см. на сайте журнала «*Геосистемы переходных зон*»: <http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-1-4.pdf>

волны применен экспресс-метод оперативного прогноза цунами. Способ позволяет по данным станций измерения уровня океана в режиме реального времени рассчитывать форму цунами в любой точке океана и вблизи побережья. Расчет цунами 15.01.2022, его гравитационной составляющей, на удаленных от очага станциях системы DART выполнен по данным ближайших к вулкану станций DART 51425 и 52406. Для адекватного прогноза достаточно информации о цунами ближайших к очагу станций DART длительностью четверть первого периода, что особенно важно в условиях оперативного режима. Результат удовлетворяет определению понятия «прогноз цунами», сформулированному Межправительственной океанографической комиссией ЮНЕСКО. Подтверждено, что экспресс-метод может давать прогноз цунами независимо от механизма его возбуждения. Остается невыясненным вопрос, насколько адекватной является оценка амплитуды поверхностных волн по данным о давлении на дне.

Ключевые слова: цунами, оперативный прогноз цунами, службы предупреждения о цунами, Тихий океан, измерения уровня океана, волны Лэмба, вынужденные волны, свободные волны

For citation: Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. Assessment of the tsunami in the Pacific Ocean caused by the explosion of the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano on January 15, 2022, using the express method of operational forecasting. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 1, pp. 56–65. (In Russ. & in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.056-065>; <https://www.elibrary.ru/kktwzl>. [The translation from Russian: Королев Ю.П., Королев П.Ю. Оценка цунами в Тихом океане, вызванного взрывом вулкана Хунга Тонга–Хунга Хаапай 15 января 2022 г., экспресс-методом оперативного прогноза [Electronic resource]. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 1. <http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-1-4.pdf>]

Introduction

A powerful explosive eruption of the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano (hereinafter Tonga) occurred in the South Pacific Ocean on January 15, 2022*. It is estimated to be the largest underwater volcanic eruption in almost a century and a half since the catastrophic destruction of Krakatoa in Indonesia in 1883. The volcanic island formed shortly before the eruption was completely destroyed. The products of the explosion rose to a height of 58 km [1]. The effect of the explosion was observed in all environments: the ionosphere, the atmosphere, in the ocean and on its surface [2].

The eruption of the volcano caused a catastrophic tsunami on the nearby islands of the Tonga archipelago: up to 22 m at a distance of about 90 km from the volcano. The tsunami caused damage not only to nearby island nations, including the Kingdom of Tonga and Fiji, but also to coastal areas along the Pacific coast, including New Zealand, Japan and Peru [1]. Run-ups of up to 1.3 m were observed in Japan, over 3.5 m in California, about 1 m in Chile and up to 1 m in Peru*.

The high-pressure wave in the atmosphere was recorded by many barographs not only on the islands of the Pacific Ocean, but also on the continents. The pressure wave above the ocean surface (also called the Lamb wave), propagating at a speed close to the speed of sound in the atmosphere, caused disturbances of the free surface of the ocean in the form of a forced wave moving at the same speed. Hereinafter, such a wave is called a baric wave. Along with this, changes in the water surface level in the explosion area generated gravity (free) waves in the ocean, propagating at the speed of long waves. Baric and/or gravity waves were recorded by many deep-sea bottom stations of the DART system (NOAA Center for Tsunami Research**) in the Pacific Ocean (according to National Data Buoy Center NOAA; https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml). A small number of stations recorded both waves from the moment of arrival of the baric wave. Due to the difference in propagation speeds, the gravity wave noticeably lags behind the baric wave. The amplitudes of the baric and gravity waves, according to the data of deep-sea stations, are comparable even at large distances from the disturbance. The attenuation

* NOAA National Centers for Environmental Information. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search> (accessed 08.02.2025).

** <http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart> (accessed 08.02.2025).

of the amplitude of baric and gravity waves is the same and inversely proportional to the square root of the distance from the source [3]. Waves of this type, described in the space of two variables, have a leading edge and no trailing edge. The oscillations behind the front, decreasing, continue for a long time.

The mechanism of waves excitation, both in the atmosphere and on the ocean surface by the processes that occurred in the eruption center of the Tonga volcano, is quite complex. It is possible that pressure waves in the atmosphere were not caused by a single explosion. In [4], it is assumed that five explosions of varying intensity occurred in the area of the volcano within half an hour or an hour. A rapid (explosive) change in atmospheric pressure is itself a source of gravity waves. The shift (repulsion) of water masses and/or products of the destruction of a volcanic island can also be an additional source of gravity waves. In any case, surface waves are a superposition of baric and gravity waves after the arrival of the latter at the observation point.

Various aspects of phenomena in the atmosphere, on the surface and on the ocean floor are described in numerous works. Pressure waves in the atmosphere based on natural data were analyzed in works [5, 6]. Numerical modeling of pressure waves based on a specially constructed source was performed in the article [3]. The influence of atmospheric pressure waves on the generation of waves on the ocean surface based on numerical modeling was studied in [3, 7–12] and on the website of the NOAA Center for Tsunami Research*. The process of generating gravity waves as a result of disturbances of the water surface in the source was considered using a numerical model in [3, 13]. The parameters of the disturbance source were selected based on the degree of coincidence of the waveforms of the computed and recorded waves in the ocean.

In work [14], a one-dimensional model of excitation of forced waves in a liquid layer under the action of a high-pressure wave in the atmosphere was considered. It is shown that the amplitude of

the bottom pressure variations is higher than the amplitude of the pressure variations above the free surface by a factor of $U^2/(U^2-gH)$, where U is the pressure wave velocity in the atmosphere, H is the depth of the liquid layer, and g is the gravity acceleration. The validity of this statement is verified by comparing the data on the ocean floor pressure measured by the deep-sea stations DART 21418, 21420, and 51407, and the data from the land-based barographs closest to these stations [2, 14]. The amplitude of the bottom pressure variations, expressed in centimeters of water column, is higher than the amplitude of forced waves on the free surface by a factor of U^2/gH . The effects studied in [2, 14] were not considered in the above-mentioned works.

The all above-mentioned works did not discuss issues related to the operational tsunami forecast. It was only noted that the existing tsunami warning services were not prepared for forecast this type of event [3, 5, 8]. It is proposed to supplement existing methods of short-term tsunami forecasting with algorithms that allow taking into account the excitation of tsunamis by atmospheric pressure waves [1, 3–5, 8].

The US Tsunami Warning Service, relying on the current NOAA method, also known as the SIFT method**, did not form a forecast for the 15.01.2022 tsunami, its gravity component, due to the fact that there are no corresponding synthetic mareograms in the database for the eruption area. In accordance with the methodology underlying the method, a tsunami was computed in the Pacific Ocean after the event. To obtain the gravity wave form, synthetic mareograms were computed from 9 Gaussian sources in the focal area of the volcano. Tsunami wave forms at remote locations were calculated using the computed synthetic mareograms and data from three DART stations. The data from these stations did not include the initial parts of the records corresponding only to baric waves. The superposition of baric and gravity waves in the DART records complicated the tsunami analysis and the source inversion process for event modeling (<https://nctr.pmel.noaa.gov/>

* NOAA Center for Tsunami Research: Volcano-generated Tsunami Event – January 15, 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha’apa Tsunami. URL: <https://nctr.pmel.noaa.gov/tonga20220115/> (accessed 08.02.2025).

** NOAA Center for Tsunami Research: Tsunami Forecasting. URL: <https://nctr.pmel.noaa.gov/tsunami-forecast.html> (accessed 08.02.2025).

tonga20220115/). The amplitudes of the computed waves are generally reproduced, even for remote locations. The difficulty of inverting the mixed DART records may be the main reason for some of the model's shortcomings.

For other events, the sea level data used for forecasting may also be distorted by the presence of signals (noise) as a result of seismic waves passing along the ocean floor. This is possible when the sea level monitoring stations are close to the source, for example, the DART 46409 station during the event on 23.01.2018 near Kodiak Island. In such cases, difficulties with identifying the tsunami itself may arise. The tsunami computation based on sea level data containing seismic noise is carried out in [15], where it is shown that the calculated waveforms may be distorted, but, nevertheless, allow us to assess the degree of danger of the expected tsunami.

The tsunami forecast for 15.01.2022 could have been made using the express method of operational tsunami forecast [16]. Previously [17, 18], when modeling the 2011 Tohoku tsunami, it was shown that the method gives an adequate result, despite the fact that the tectonic excitation mechanism was accompanied, presumably, by an underwater landslide [19]. The method is approximate, but allows for an adequate assessment of the expected tsunami at a given point in real time.

The aim of the work and problem statement

The aim of this study was to confirm the applicability of the express method of operational forecasting in cases of tsunami generation by non-seismic sources. The eruption of the Tonga volcano is a good example to demonstrate the capabilities of the express method.

In accordance with the algorithm of the express method [16], auxiliary computations of waves from an elementary circular source with a center coinciding with the epicenter of the volcanic eruption were carried out to construct the transfer function. No assumptions were made about the mechanism of excitation of these waves. In operational mode, the computation is performed immediately after receiving information about the

coordinates of the tsunami source. Based on data on tsunamis in the ocean, the expected tsunami waveforms at specified points are calculated using the transfer function. In real time – after receiving information about the passage of a tsunami through an ocean level measuring station. In the event on 15.01.2022, the data from the bottom stations DART 51425 or 52406 closest to the explosion site were used for the forecast. Only the part of the record containing the gravitational component was used. The computation was performed for the DART stations whose records contain both baric and gravitational components.

Unlike the NOAA method, only one elementary source was used for auxiliary computation; the tsunami calculation was performed based on data from one DART station.

In operational conditions, it is advisable to use, if possible, short segments of the DART station data series (for example, a quarter of the first period) to form a forecast. The quality of the computation (forecast) is assessed by the possibility of adequately determining the degree of danger of the expected tsunami when compared with the available actual data.

Results and discussion

Preliminary experiments

The computation area diagram of numerical experiments with the indication of the epicenter and location of the DART system stations is shown in Fig. 1. The coordinates of the stations were taken from the National Data Buoy Center website (https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml).

To check the adequacy of further computations, tsunami waveforms at remote DART stations were preliminarily calculated based on data from the station closest to the source for different durations: from a quarter of the period to a full period and more. These data contain information on both the gravitational and baric components, which cannot be separated. The presence of the baric component may affect the adequacy of the gravity wave assessment at remote points. As an example, Fig. 2 shows the results of calculating waveforms at the DART 52401 based on data from the DART 51425 for different durations (17,

22, 30, and 42 min), corresponding to a gravity wave.

Wave forms, natural and computed based on initial data of different duration, from a quarter to the full first period, generally coincide well. There are minor discrepancies in the calculated forms, which are due to the approximate nature of the express method, as well as the presence of a baric component in the initial data. A further increase of the data segment does not lead to an improvement of the forecast, since the data from the DART 51425 and the DART 52401 stations contain information about the baric wave. The result shows that under operational conditions, the use of short segments of a data series gives a completely adequate forecast of the expected tsunami.

Computation of gravitational components of waves caused by the Tonga volcano eruption

The express method of operational tsunami forecasting was used to compute gravity waves generated as a result of the explosive eruption of the Tonga volcano at points in the ocean where DART stations are located (data taken from the National Data Buoy Center website; https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml). For auxiliary computations, an elementary source in the form of a circular initial elevation of the free ocean surface in the epicentral region of the eruption was used. Data from the DART 51425 or the DART 52406 stations, which are closest to the epicenter of the explosion, were used. The published data from the



Fig. 1. Map of the area used for computation. The asterisk shows the epicenter of the explosion. Five-digit numbers are the positions of the DART system stations. The stations that registered both baric and gravity waves are marked in blue (in larger font).

DART bottom stations on pressure are expressed in meters. Parts of the records containing gravitational components were used, the arrival of which was determined by the travel time of the wave from the auxiliary source. For the DART 51425, this time is 120 minutes from the beginning of the eruption, for the DART 52406 – 252 minutes. As noted above, the records contain both baric and gravitational components.

The computation was performed for the DART stations in the ocean that recorded both baric and gravity waves. The numbers of these stations are shown in larger font in Fig. 1.

The initial data from DART 51425 are shown in Fig. 2 in the left column at the top. The segment of the series (a quarter of the first period) used for the calculations is highlighted in red (from 120 to 137 minutes after the volcanic explosion).

The DART station data shown in Fig. 3 include both baric and gravitational components.

The results of the express method calculation based on the data from DART 51425 with duration of a quarter of the first period are shown in Fig. 3.

The computation shows the arrival of a gravity wave, starting with a decrease in the level. At some stations, the most distant from the source, the amplitudes of the computed waves are lower than the recorded ones. This is explained, firstly, by the fact that the initial data for the computation contain a baric component, and secondly, by the fact that the records of remote stations also contain both components.

Qualitatively, the waveforms of the calculated waves coincide with the low-frequency components of the recorded waves, including the baric and gravitational components. A detailed spectral analysis of the signals was not included in the objectives of the work.

The results of similar computation based on data from another station, DART 52406, are shown in Fig. 4. The record of this station is shown by a thin black line in Fig. 4 (left column, above), where the segment of the series used for the calculations is highlighted in red (a quarter of the period, from 252 to 273 minutes after the volcanic explosion).

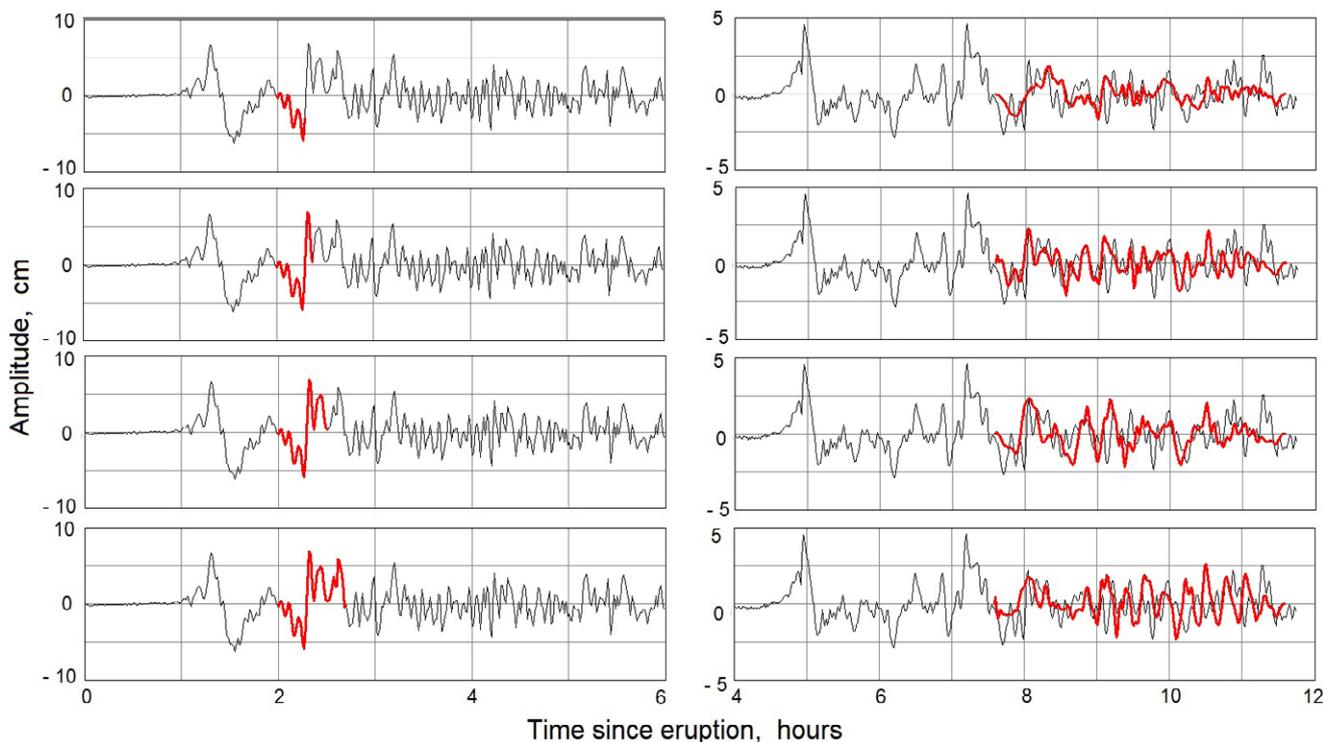


Fig. 2. The left column shows the data from the DART 51425 station of varying duration (17, 22, 30 and 42 min). The red line highlights the section of the data series used for calculations. The right column shows waveforms at the DART 52401 station: natural (thin black line) and computed based on the data from the DART 51425 station of varying durations (red line), starting from 120 minutes after the start of the eruption.

As shown in [2, 14], the amplitudes of forced surface (baric) waves estimated from bottom station data are apparently overestimated. The correction factor gH/U^2 was applied to the part of the baric component preceding the arrival of the gravity wave in accordance with [2, 14]. The values of the correction factors are given in the table. When calculating the factors, the propagation velocity of the atmospheric pressure wave was taken to be 312 m/s [14]. The corrected forms of baric waves are shown in Fig. 4 with a thick black line. The same figure shows the uncorrected data from the DART stations (thin black line), including both the baric and gravitational components. It is evident that the corrected amplitudes of forced waves on the ocean surface are almost 2 times less than those measured by the bottom sensors. The use of a correction factor for data containing both baric and gravitational components is not appropriate.

The same figure shows the results of computing the gravitational component (red line) based

on the DART 52406 station data. As in the previous example of computing based on the DART 51425 station data, the arrival of the gravity wave begins with a decrease in the level. At some stations, the amplitudes of the calculated waves are lower than the recorded ones, which are explained by the presence of a baric component in the initial DART 52406 station data for the computation and in the records of remote stations. The structures of low-frequency oscillations of the calculated and actual ones generally correspond to each other.

The waveforms of the gravitational components of the waves computed based on the DART 51425 and DART 52406 stations coincide with the accuracy necessary to assess the degree of tsunami hazard.

The structure of the wave on the free surface is quite complex and includes both the wave caused by the main wave of atmospheric pressure and secondary waves excited when the atmospheric pressure wave passes over irregularities in

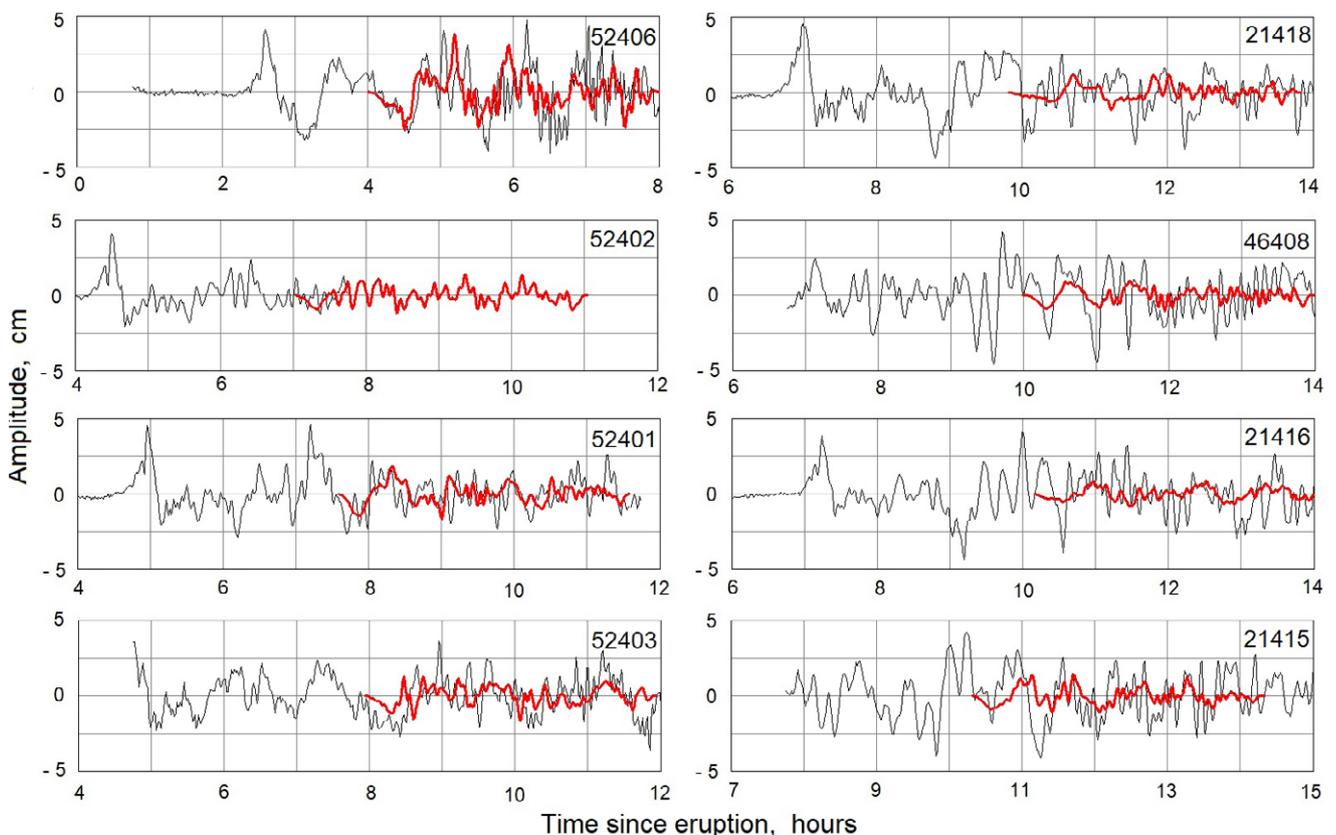


Fig. 3. Tsunami waveforms obtained by the express method of operational tsunami forecasting (red line) based on the 17-minute data from the DART station 51425. The DART station data in centimeters of water column are shown by a thin black line. Each fragment of this and the following figure shows the DART station number.

Table. Correction factor values

Indicator	DART station							
	52406	52402	52403	52401	21418	46408	21416	21415
Ocean depth H , m	1800	5963	4542	5590	5664	5374	5812	4775
Correction factor gH/U^2	0.181	0.601	0.458	0.563	0.571	0.542	0.586	0.481

Note. U is the velocity of the pressure wave in the atmosphere, H is the depth of the liquid layer, and g is the acceleration due to gravity. The ocean depths at the locations of the DART stations given in the table were taken from the National Data Buoy Center website (https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml).

the earth’s surface. In addition, when passing over areas of the ocean with an irregular bottom, the atmospheric pressure wave generates free gravity waves. These waves are superimposed by a free gravity wave excited by a volcanic explosion and other accompanying effects in the source. It is impossible to separate these components. The amplitudes of the waves on the ocean surface excited by

atmospheric pressure waves, estimated from the data of bottom stations, as shown in [2, 14], are apparently overestimated. It is impossible to apply a correction factor to the total wave without separating the components. In this regard, the question arises as to how adequate the assessment of the amplitudes of surface waves based on the data on the pressure at the bottom is.

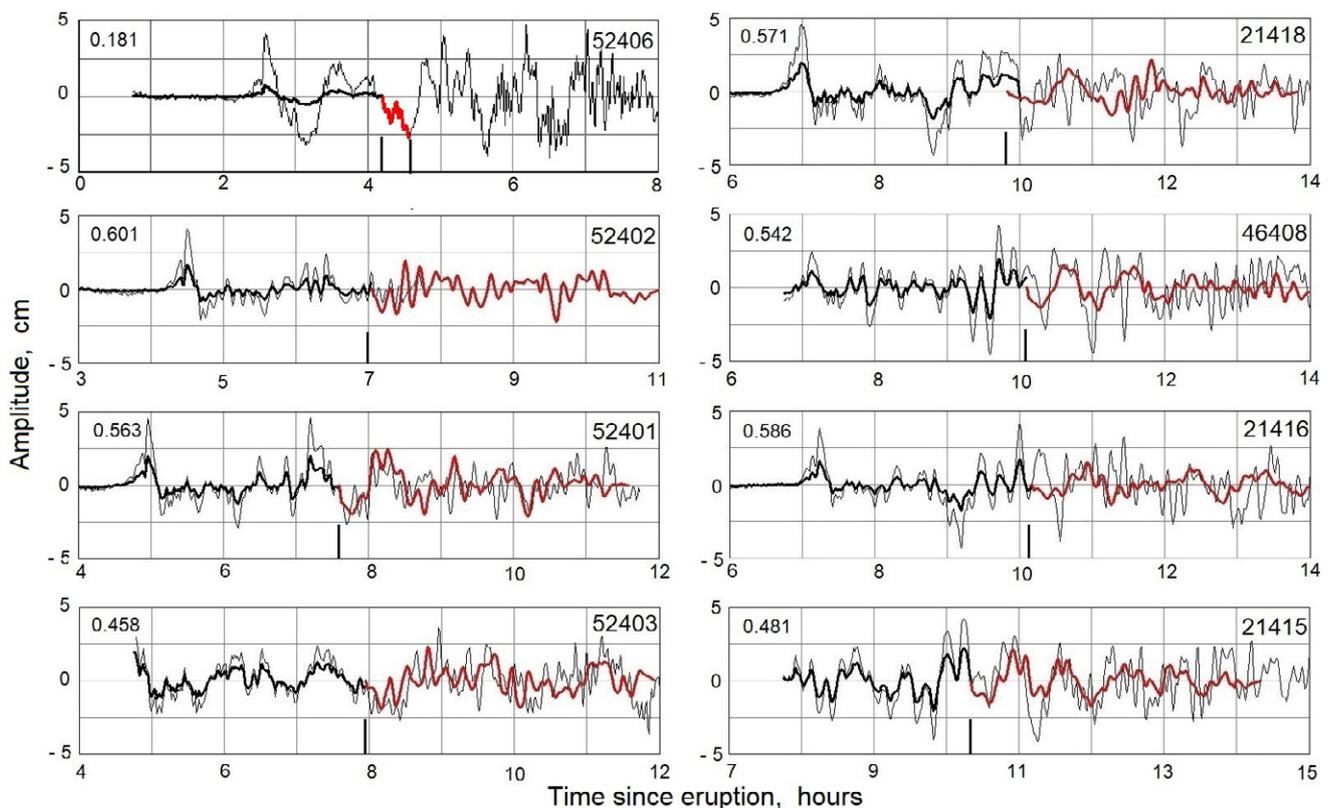


Fig. 4. Tsunami waveforms (red line) computed based on the 21-min data from the DART 52406 station data (left column, top; the section of the data series used for the computation is highlighted in red and marked with vertical lines). The moment of entry of the gravitational component is marked by a vertical line. The bottom station data are shown by a thin black line. The amplitude of the part of the record preceding the gravity wave is multiplied by the correction factor gH/U^2 (thick black line). The value of the factor is indicated for each DART station (top left in each fragment).

In general, the computed tsunami waveforms (gravitational component) give quite adequate results, despite the interference caused by the baric component. This confirms the assumption that the express method is applicable for forecasting tsunamis of non-seismic origin. The quality of the computation is comparable to the quality of tsunami calculations by the current NOAA method.

The assessment of tsunami waveforms near the coast was not included in the objectives of the work. Nevertheless, the result satisfies the definition of the concept of “tsunami forecast” formulated by the Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO*: the time of arrival of the expected tsunami at a given point is given, the amplitudes of individual waves and the time of their arrival are determined. Earlier [18] it was shown using actual data that the express method can be used to forecast tsunamis in advance near the coasts based on ocean tsunami data. The moment of forecast generation is determined by the time of receiving information about the passage of the first quarter of the tsunami period through the registration point.

Conclusions

The express method of operational tsunami forecasting was used to compute the gravitational component of the wave from the explosive eruption of the Tonga volcano on January 15, 2022.

It was shown that for an adequate forecast, information on tsunamis from the DART stations closest to the source with duration a quarter of the first period is sufficient, which is especially important in the operational mode.

A good match was obtained between the waveforms computed by the express method of operational tsunami forecasting and the waveforms recorded by the DART bottom stations measuring the ocean level. The differences in these waveforms are explained by the presence of baric components in the bottom pressure data.

It was confirmed that the express method can provide a tsunami forecast regardless of the excitation mechanism. The express method, like other

methods of operational tsunami forecasting, can be supplemented with an algorithm for calculating baric waves. However, the question of how adequate the assessment of the amplitude of surface waves based on the data on the bottom pressure in events similar to the one considered remains unclear.

References

1. Terry J.P., Goff J., Winspear N., Bongolan V.P., Fisher S. **2022**. Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau. *Geoscience Letters*, 9, 24. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00232-z>
2. Nosov M.A., Kolesov S.V., Sementsov K.A. **2023**. Interpretation of signals recorded by ocean-bottom pressure gauges during the passage of atmospheric lamb wave on 15 January 2022. *Remote Sensing*, 15(12), 3071. <https://doi.org/10.3390/rs15123071>
3. Gusman A.R., Roger J., Noble C., Wang X., Power W., Burbidge D. **2022**. The 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano air-wave generated tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 179: 3511–3525. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03154-1>
4. Purkis S.J., Ward S.N., Fitzpatrick N.M., Garvin J.B., Slayback D., Cronin S.J., Palaseanu-Lovejoy M., Dempsey A. **2023**. The 2022 Hunga-Tonga megatsunami: Near-field simulation of a once-in-a-century event. *Science Advances*, 9(15). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adf5493>
5. Hu G., Li L., Ren Z., Zhang K. **2023**. The characteristics of the 2022 Tonga volcanic tsunami in the Pacific Ocean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23: 675–691. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-675-2023>
6. Shrivastava M.N., Sunil A.S., Maurya A.K., Aguilera F., Orrego S., Sunil P.S., Cienfuegos R., Moreno M. **2023**. Tracking tsunami propagation and Island’s collapse after the Hunga Tonga Hunga Ha’apai 2022 volcanic eruption from multi-space observations. *Scientific Reports*, 20109. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46397-1>
7. Miyashita T., Nishino A., Ho T.-C., Yasuda T., Mori N., Shimura T., Fukui N. **2023**. Multi-scale simulation of subsequent tsunami waves in Japan excited by air pressure waves due to the 2022 Tonga volcanic eruption. *Pure and Applied Geophysics*, 180: 3195–3223. <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03332-9>
8. Fujii Y., Satake K. **2024**. Modeling the 2022 Tonga eruption tsunami recorded on ocean bottom pressure and tide gauges around the Pacific. *Pure and Applied*

* Tsunami Glossary / Intergovernmental Oceanographic Commission. 2019. 4 Ed. Paris: UNESCO, p. 35–36. (IOC Technical Series; 85). URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000188226> (accessed 04.03.2025).

- Geophysics*, 181: 1793–1809. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03477-1>
9. Tanioka Y., Yamanaka Y., Nakagaki T. **2022**. Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth, Planets and Space*, 74, 61. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01614-5>
 10. Kubo H., Kubota T., Suzuki W., Aoi S., Sandanbata O., Chikasada N., Ueda H. **2022**. Ocean-wave phenomenon around Japan due to the 2022 Tonga eruption observed by the wide and dense ocean-bottom pressure gauge networks. *Earth, Planets and Space*, 74, 104. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01663-w>
 11. Omira R., Ramalho R.S., Kim J., González P.J., Kadri U., Miranda J.M., Carrilho F., Baptista M.A. **2022**. Global Tonga tsunami explained by a fast-moving atmospheric source. *Nature*, 609: 734–740. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04926-4>
 12. Kubota T., Saito T., Nishida K. **2022**. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*, 377(6601): 91–94. <https://doi.org/10.1126/science.abo4364>
 13. Heidarzadeh M., Gusman A.R., Ishibe T., Sabeti R., Sepic J. **2022**. Estimating the eruption-induced water displacement source of the 15 January 2022 Tonga volcanic tsunami from tsunami spectra and numerical modeling. *Ocean Engineering*, 261, 112165. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112165>
 14. Nosov M.A., Sementsov K.A., Kolesov S.V., Pryadun V.V. **2022**. Atmospheric lamb wave manifestations in bottom pressure variations. *Moscow University Physics Bulletin*, 77(6): 896–904. <https://doi.org/10.3103/s0027134922060091>
 15. Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. **2020**. Short-term forecast of local tsunamis based on data containing seismic noise from deep-ocean stations closest to the sources. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 461–473. (In Russ. & in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.447-460.461-473>
 16. Korolev Yu.P. **2011**. An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(11): 3081–3091. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3081-2011>
 17. Korolev Yu.P., Ivelskaya T.N. **2012**. [Enhancement of operational tsunami forecast and tsunami alarms. Analysis of recent tsunamis]. *Problemy analiza riska = Issue Risk Analysis*, 9(2): 76–91. (In Russ.).
 18. Korolev Yu.P. **2024**. Express method for operational tsunami forecasting: possibility of its application on the Pacific coast of Russia. *Physical Oceanography*, 31(5): 736–754.
 19. Pararas-Carayanis G. **2011**. Tsunamigenic source mechanism and efficiency of the March 11, 2011 Sanriku earthquake in Japan. *Science of Tsunami Hazards*, 30(2): 126–152. URL: <http://www.tsunamisociety.org/STHV0130N2Y2011.pdf>

About the Authors

Korolev, Yury P. (<https://orcid.org/0000-0002-7068-7341>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher, Tsunami Laboratory, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, Yu_P_K@mail.ru

Korolev, Pavel Yu. (<https://orcid.org/0000-0003-3741-7654>), Researcher, Tsunami Laboratory, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Received 20 February 2025
Accepted 13 March 2025

Об авторах

Королёв Юрий Павлович (<https://orcid.org/0000-0002-7068-7341>), кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, Россия, Yu_P_K@mail.ru

Королёв Павел Юрьевич (<https://orcid.org/0000-0003-3741-7654>), научный сотрудник, лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, Россия

Поступила 20.02.2025
Принята к публикации 13.03.2025

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 550.34.01

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.066-072>
<https://www.elibrary.ru/xuvcpw>

О траекториях динамической системы Селькова, описывающей автоколебания источников микросейсм

В. Б. Глячев[@], Д. С. Ушко

^{@E-mail:} tyachev@adygnet.ru

Адыгейский государственный университет, Майкоп, Россия

Резюме. Рассмотрены некоторые аспекты автоколебаний источников микросейсм, представленные математической моделью гликолиза Селькова. Работа уточняет некоторые выводы, сделанные в ранее опубликованной в журнале «Геосистемы переходных зон» статье. В частности, показано, что динамическая система, моделирующая микросейсм, имеет единственное состояние равновесия, местоположение которого меняется в ограниченной части фазовой плоскости в зависимости от значений параметра, характеризующего концентрацию трещин. Доказано, что система имеет простой неустойчивый узел или фокус, окруженный хотя бы одним устойчивым предельным циклом.

Ключевые слова: микросейсм, модель Селькова, автоколебания, круг Пуанкаре, состояние равновесия, ось концентрации трещин

On the trajectories of the Selkov dynamic system describing the self-oscillation of microseism sources

Vyacheslav B. Tlachev[@], Damir S. Ushkho

^{@E-mail:} tyachev@adygnet.ru

Adyghe State University, Maykop, Russia

Abstract. Some aspects of the self-oscillation of microseismic sources represented by the Selkov mathematical model for glycolysis were reviewed. The paper clarifies some of the conclusions made in a previously published article in the journal “Geosystems of Transition Zones.” In particular, it was shown that the dynamic system that models microseisms has only one equilibrium state, the location of which in a bounded part of the phase plane varies depending on the values of the parameter characterizing the fracture concentration. It was proved that the system has a simple unstable node or focus surrounded by at least one stable limit cycle.

Keywords: microseisms, Selkov model, auto-oscillation, Poincaré’s disk, equilibrium state, crack concentration axis

Для цитирования: Глячев В.Б., Ушко Д.С. О траекториях динамической системы Селькова, описывающей автоколебания источников микросейсм. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 1, с. 66–72. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.066-072>; <https://www.elibrary.ru/xuvcpw>

For citation: Tlachev V.B., Ushkho D.S. On the trajectories of the Selkov dynamic system describing the self-oscillation of microseism sources. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 1, pp. 66–72. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.066-072>; <https://www.elibrary.ru/xuvcpw>

Благодарности

Авторы благодарны рецензенту за внимательное прочтение работы и полезные замечания.

Acknowledgements

The authors are grateful to the Reviewer for careful reading of this paper and helpful comments.

Введение и постановка задачи

Построение и использование математических моделей в различных науках существенно расширяют инструментарий и доказательность исследуемых процессов и явлений природы. В работе [1] впервые к исследованию геологических процессов применена математическая модель Селькова. Отметим, что указанная статья опубликована с примечанием о дискуссионности. Авторам [1] удалось описать взаимодействие между двумя видами трещин системой нелинейных уравнений Селькова [2]. При этом они не только достаточно подробно и ясно обосновали построение математической модели в области теории землетрясений, но и детально исследовали процессы генерации микросейсм, закономерности, которые им присущи. Это весьма важно в прикладном аспекте. Компьютерное моделирование позволило авторам исследовать процесс образования автоволн источников микросейсм. Однако, как известно, компьютерное (численное) моделирование не позволяет в наиболее общем виде исследовать все зависимости процесса от параметров. Для этого существуют определенные математические теории, в частности качественная теория дифференциальных уравнений [3].

Отметим, что модель Селькова развивается, появляются ее аналоги с более широким спектром использования, например модели Слинько и Чумакова–Слинько [7–9]. Кроме того, следует отметить хорошо зарекомендовавшие себя при исследовании различных процессов кинетические уравнения, которые являются альтернативой системе Селькова, – это уравнения моделей Гинзбурга–Ландау или Ландау–Халатникова (см., например, [10, 11] и цитированную в них литературу).

В данной заметке представлен математически строгий анализ поведения решений уравнений Селькова вблизи особых точек, основанный на теории динамических систем, и доказательство некоторых утверждений, которые не получили определенного (должного) освещения в работе [1].

Авторами работы [1] отмечается, что автоколебания источников микросейсм наиболее полно описываются моделью гликолиза Селькова [2], которую в безразмерных величинах можно представить в виде следующей автономной системы:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -x + ay + bx^2y, \\ \frac{dy}{dt} = c - ay - bx^2y, \end{cases} \quad (1)$$

где $a > 0$, $b > 0$, $c > 0$, $x(t)$ – величина, представляющая собой концентрацию трещин небольшой длины, которые являются источниками роста более крупных трещин; $y(t)$ – концентрация сравнительно крупных трещин, которые формируют сигналы микросейсм.

Для системы (1) точка $F\left(c; \frac{c}{a+bc^2}\right)$ в ограниченной части фазовой плоскости является состоянием равновесия. При переносе начала координат в точку F система (1) принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{bc^2 - a}{a + bc^2}x + (a + bc^2)y + \frac{bc}{a + bc^2}x^2 + 2bcxy + bx^2y, \\ \frac{dy}{dt} = \frac{-2bc^2}{a + bc^2}x - (a + bc^2)y - \frac{bc}{a + bc^2}x^2 - 2bcxy - bx^2y. \end{cases} \quad (2)$$

Следуя положениям монографии [3], с целью установления характера состояния равновесия F определим для системы (2) величины: σ – дивергенцию векторного поля этой системы в точке $(0;0)$ и определитель Δ , составленный из коэффициентов ее линейных членов:

$$\sigma = \frac{-b^2c^4 + (b - 2ab)c^2 - a - a^2}{\Delta}, \quad \Delta = a + bc^2. \quad (3)$$

Из (3) видно, что $\Delta > 0$. Корнями уравнения $\sigma = 0$ относительно c являются выражения

$$c_1 = \sqrt{\frac{1 - 2a - \sqrt{1 - 8a}}{2b}} \quad \text{и} \quad c_2 = \sqrt{\frac{1 - 2a + \sqrt{1 - 8a}}{2b}},$$

где $0 < a < \frac{1}{8}$.

Замечание 1. В данной работе рассматриваются только вещественные корни, что важно с точки зрения реальных приложений.

С помощью преобразований Пуанкаре [3] исследуем поведение траекторий системы (1) в бесконечно удаленных частях фазовой плоскости в целях установления характера их расположения в ограниченной части плоскости. В частности, результаты такого исследования нами используются в качестве инструмента для решения проблемы центра-фокуса применительно к состоянию равновесия F , а также доказательства существования предельного цикла вокруг F .

Результаты исследования

Для решения проблемы центра-фокуса точки F необходимо рассмотреть поведение траекторий системы (1) в бесконечно удаленных частях фазовой плоскости. Это осуществляется с помощью преобразований Пуанкаре [3]. В нашем случае преобразование Пуанкаре вида $\{x=1/z, y=u/z\}$ переводит систему (1) в новую систему вида:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = -bu - bu^2 + (1-a)uz^2 + cz^3 - au^2z^2 \equiv P(u, z), \\ \frac{dz}{dt} = -buz + z^3 - auz^3 \equiv Q(u, z). \end{cases} \quad (4)$$

Состояниями равновесия системы (4) при условии $z = 0$ являются точки: $W_1(u = 0; z = 0)$, $W_2(u = -1; z = 0)$.

Переход к новым координатам с помощью формул $(x=v/z, y=1/z)$ позволяет перевести систему (1) в систему вида:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = bv^2 + az^2 + bv^3 + (a-1)vz^2 - cvz^3, \\ \frac{dz}{dt} = bv^2z + az^3 - cz^4. \end{cases} \quad (5)$$

Замечание 2 [3]. Система (5), полученная из системы (1), рассматривается только с целью установления характера состояния равновесия $(0;0)$.

В случае $\left(\frac{dv}{dt}\right)_{\substack{v=0 \\ z=0}} \neq 0$ все бесконечно уда-

ленные состояния равновесия системы (1)

удовлетворяют системе $\begin{cases} z = 0, \\ P(u, z) = 0. \end{cases}$ Тогда оче-

видно, что система (1) имеет только три бесконечно удаленных состояния равновесия: $W_1(u = 0; z = 0)$, $W_2(u = -1; z = 0)$, $W_3(v = 0; z = 0)$, из которых точка W_1 представляет собой сложное состояние равновесия, для которого $\sigma = -b \neq 0$.

Применим к системе (4) преобразование $\begin{cases} \bar{u} = z, \\ \bar{z} = u, \end{cases}$ которое приводит ее к новой системе:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{u}}{dt} = -b\bar{u}\bar{z} + \bar{u}^3 - a\bar{u}^3\bar{z}, \\ \frac{d\bar{z}}{dt} = -b\bar{z} - b\bar{z}^2 + (1-a)\bar{u}^2\bar{z} + c\bar{u}^3 - a\bar{u}^2\bar{z}^2. \end{cases} \quad (6)$$

Изменим масштаб времени в системе (6) по формуле $\tau = -bt$:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{u}}{d\tau} = \bar{u}\bar{z} - \frac{1}{b}\bar{u}^3 + \frac{a}{b}\bar{u}^3\bar{z} \equiv P_2(\bar{u}, \bar{z}), \\ \frac{d\bar{z}}{d\tau} = \bar{z} + \bar{z}^2 + \frac{(a-1)}{b}\bar{u}^2\bar{z} - \frac{c}{b}\bar{u}^3 + \frac{a}{b}\bar{u}^2\bar{z}^2 \equiv \bar{z} + Q_2(\bar{u}, \bar{z}). \end{cases} \quad (7)$$

Для того чтобы установить расположение траекторий системы (7) в достаточно малой окрестности состояния равновесия $(0;0)$, находим решение уравнения $\bar{z} + Q_2(\bar{u}, \bar{z}) = 0$ относительно \bar{z} в виде следующего степенного ряда: $\bar{z} = \varphi(\bar{u}) = \frac{c}{b}(\bar{u})^3 + \frac{c(1-a)}{b^2}(\bar{u})^5 \dots$, который позволяет получить выражение

$$P_2(\bar{u}, \varphi(\bar{u})) = -\frac{1}{b}(\bar{u})^3 + \frac{c}{b}(\bar{u})^4 \dots \quad (8)$$

Из (8) по теореме 65 [3] следует, что точка W_1 – это топологическое седло, достаточно малая окрестность которого состоит из четырех гиперболических секторов.

Прямыми вычислениями можно показать, что точка W_2 – простой неустойчивый узел.

Благодаря тому факту, что правые части уравнений системы (5) не содержат линейных членов (вторая, третья и четвертая степени), тип состояния равновесия точки W_3 можно определить по методу Фроммера [4].

Рассмотрим дифференциальное уравнение траекторий для системы (5) в виде

$$\frac{dz}{dv} = \frac{bv^2z + az^3 - cz^4}{bv^2 + az^2 + bv^3 + (a-1)vz^2 - cvz^3}. \quad (9)$$

Введем обозначения:

$$\bar{P}_3(v, z) = bv^2z + az^3, \quad \bar{Q}_2(v, z) = bv^2 + az^2. \quad (10)$$

По терминологии [4] направления, вдоль которых интегральные кривые могут входить в особую точку (0;0) уравнения (9), называются критическими. Критические направления находим с учетом (10) при решении уравнения $z \cdot \bar{Q}_2(v, z) = 0$ [4]. Единственным вещественным корнем данного уравнения является $z = 0$, так как $a = 0, b = 0$. По классификации [4] $z = 0$ – обыкновенное простое критическое направление. Далее, следуя [4], рассмотрим функцию

$$\psi(u, v) = \frac{bv^2z + az^3 - cz^4}{bv^2 + az^2 + bv^3 + (a-1)vz^2 - cvz^3} - u, \quad (11)$$

где $z = uv$. Подставляя это значение z , имеем:

$$\psi(u, v) = \frac{bvuv + avu^3 - bu - au^3 - bvu - (a-1)vuv^3}{b + au^2 + bv + (a-1)vuv^2 - cv^2u^3}. \quad (12)$$

Из (12) следует, что $\psi(u, 0) = -u$, то есть

$$\psi'_u(0, 0) = -1. \quad (13)$$

Согласно [4], равенство (13) свидетельствует о том, что только одна интегральная кривая уравнения (9) проходит через особую точку (0;0). Тем самым нами показано, что к состоянию равновесия W_3 системы (5) примыкают только две траектории: одна при $t \rightarrow +\infty$, а другая – при $t \rightarrow -\infty$, обе совпадают с экватором $z = 0$ сферы Пуанкаре. Таким образом, достаточно малая окрестность точки W_3 состоит из

двух гиперболических секторов, ограниченных одной ω -сепаратрисой и одной α -сепаратрисой, поэтому справедливо следующее утверждение:

Утверждение 1. Если $c \neq 0, a > 0, b > 0$, то система (1) имеет на экваторе сферы Пуанкаре три состояния равновесия: W_1 ($u = 0; z = 0$) – сложное (топологическое) седло, окрестность которого состоит из четырех гиперболических секторов; W_2 ($u = -1; z = 0$) – простой неустойчивый узел; W_3 ($v = 0; z = 0$) – сложное состояние равновесия, окрестность которого состоит из двух гиперболических секторов.

Рассмотрим теперь свойства состояния равновесия $F\left(c; \frac{c}{a + bc^2}\right)$. Так как, согласно (3), $\Delta > 0$, то начало координат системы (2) является простым состоянием равновесия типа «узел», «фокус» или «центр» [3, 5]. Если при этом $c \in (0; c_1) \cup (c_2; +\infty)$, то $\sigma < 0$, следовательно, точка (0;0) – простой устойчивый узел, или фокус (по терминологии [5] топологический узел); если $c \in (c_1; c_2)$, то точка с координатами (0;0) – простой неустойчивый топологический узел; если $c = c_1$ или $c = c_2$, то точка (0;0) – негрубый фокус или центр [3, 6]. К сожалению, в настоящее время в теории динамических систем для систем вида (2) нет необходимых и достаточных коэффициентных условий центра с чисто мнимыми характеристическими числами. В нашем случае проведенное выше исследование поведения траекторий системы (1) в бесконечно удаленных частях фазовой плоскости позволяет утверждать, что в рассматриваемом случае состояние равновесия F не может быть центром.

Обратимся к рис. 1, на котором изображены главные изоклины системы (1) в круге Пуанкаре.

Так как $\left(\frac{dy}{dt}\right)_{y=0} = c, \left(\frac{dx}{dt}\right)_{x=0} = au$ и параметры a, c положительны, то ось ox и полуоси оси ou являются трансверсальными по отношению к вектору поля системы (1). В соответствии с рис. 1 дуга любой траектории системы (1), расположенной в ограниченной части фа-

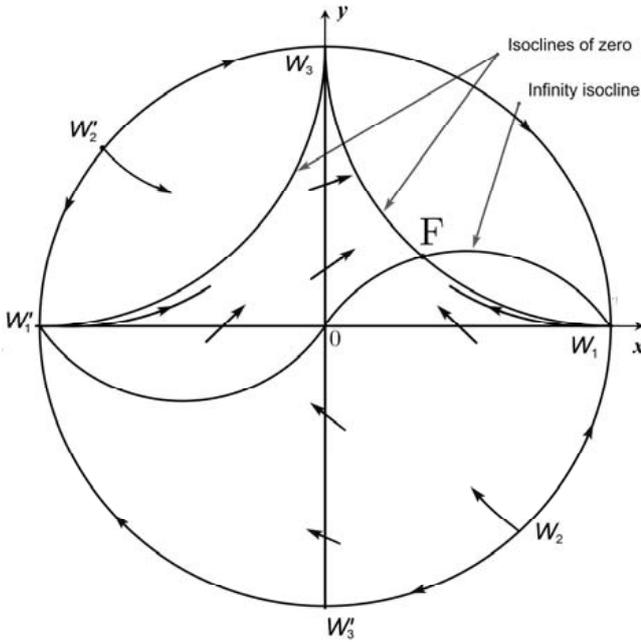


Рис. 1. Прямая $y = 0$ и полуоси вертикальной оси координат являются трансверсалиями по отношению к траекториям системы (1). α -сепаратрисы седла W_1 целиком расположены в верхней полуплоскости.

Fig. 1. The straight line $y = 0$ and the semi-axes of the vertical coordinate axis are transversals with respect to the trajectories of the system (1). The α -separatrices of saddle point W_1 are entirely located in the upper half-plane.

зовой плоскости, при $t \rightarrow +\infty$ находится в первом квадранте. Так как к состоянию равновесия W_3 примыкают лишь две траектории: ω - и α -сепаратрисы, совпадающие с экватором сферы Пуанкаре, то никакая положительная полутраектория системы (1) при $t \geq T$, где T – сколько угодно большое положительное число, не входит ни в одну из точек W_1 и W_3 . Если взять произвольную положительную полутраекторию L^+ , пересекающую ось ординат, то, согласно монографии [5, с. 52], для L^+ существует ω -предельное множество, которое может быть одного из трех типов: одно состояние равновесия; одна замкнутая траектория; совокупность состояний равновесия и траекторий, стремящихся к этим состояниям равновесия как при $t \rightarrow +\infty$, так и при $t \rightarrow -\infty$. Однако предположение о существовании центра в точке F допускает наличие у системы (1) хотя бы одного состояния равновесия, отличного от F . Таким образом, при $c = c_1$ или $c = c_2$ точка F – негрубый фокус, причем устойчивый. При $c \in (c_1; c_2)$

предельное множество для положительной полутраектории L^+ представляет собой устойчивый предельный цикл. Поэтому можно сформулировать следующее утверждение.

Утверждение 2. Если $0 < a < 1/8$, $c \in (c_1; c_2)$, то в ограниченной части фазовой плоскости система (1) имеет простой неустойчивый узел, или фокус, окруженный хотя бы одним устойчивым предельным циклом.

Фазовый портрет системы (1) изображен на рис. 2.

Замечание 3. Наличие грубых устойчивых предельных циклов на фазовой плоскости является определяющим признаком автоколебательной системы. Следовательно, изученная система (1) действительно является математической моделью реальной автоколебательной системы [2].

Замечание 4. Придерживаясь терминологии, принятой в современной качественной теории динамических систем второго порядка, точку $(0;0)$ мы называем состоянием равновесия системы (5), а для дифференциального уравнения (9) траекторий этой же системы – особой точкой.

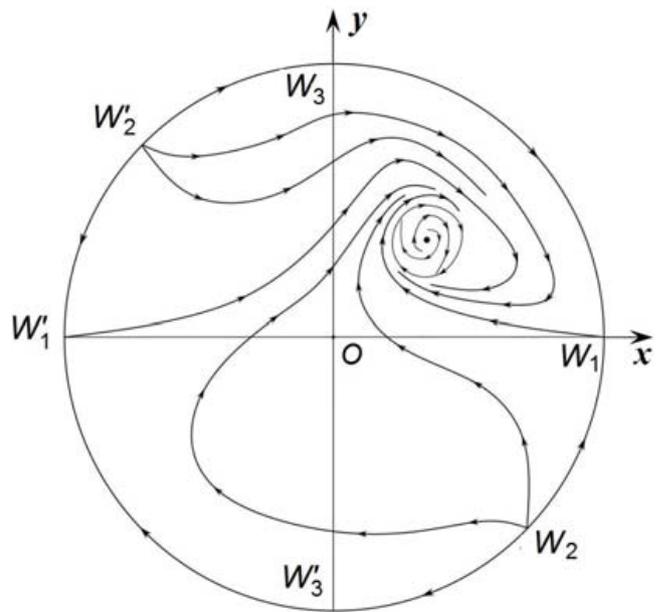


Рис. 2. Расположение траекторий системы (1) в круге Пуанкаре, т.е. на всей фазовой плоскости.

Fig. 2. The location of the trajectories of the system (1) in the Poincaré disk, i.e., on the entire phase plane.

Заключение

В работе установлен характер сложного состояния равновесия на бесконечности, что способствует доказательству наличия хотя бы одного устойчивого предельного цикла, окружающего единственное состояние равновесия в ограниченной части фазовой плоскости.

Наличие предельного цикла можно интерпретировать таким образом, что периодические изменения уровня микросейсм не обязательно связаны с внешними факторами (сезонностью). Такие изменения могут происходить по внутренним причинам (ввиду природы их источников – трещин). Хотя неочевидно, что источники микросейсм именно трещины, а не межзеренные подвижки в неоднородной среде.

Кроме этого, отметим следующее:

1) утверждение авторов [1] о том, что система (6) [1], а в нашем случае система (1) может иметь два состояния равновесия, ошибочно. Изменение параметра ν (см. (6) [1]), а в данной работе параметра c приводит только лишь к изменению местоположения единственного состояния равновесия в ограниченной части фазовой плоскости;

2) на рис. 2 статьи [1] траектория пересекает ось концентраций tr -трещин дважды, что невозможно в силу трансверсальности оси ox для траекторий системы;

3) в формуле (18) статьи [1] имеется неточность, правильное ее написание таково:

$$\nu_{1,2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1 - 2a \pm \sqrt{1 - 8a}}{b}}.$$

Список литературы

1. Маковецкий В.И., Дудченко И.П., Закупин А.С. **2017**. Автоколебательная модель источников микросейсм. *Геосистемы переходных зон*, 1(4): 37–46. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.4.037-046>
2. Сельков Е.Е. **1967**. О возможности возникновения автоколебаний в ферментных реакциях с субстратным и продуктивным угнетением. В кн.: *Колебательные процессы в биологических и химических системах*: сб. тр. Всесоюз. симпозиума по колебательным процессам в биологических химических

системах, Пущино-на-Оке, 21–26 марта 1966 г. М.: Наука, с. 93–112.

3. Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. **1966**. *Качественная теория динамических систем второго порядка*. М.: Наука, 568 с.
4. Фроммер М. **1941**. Интегральные кривые обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка в окрестности особой точки, имеющей рациональный характер. *Успехи математических наук*, 9: 212–253.
5. Баутин Н.Н., Леонтович Е.А. **1976**. *Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости*. М.: Наука, 496 с.
6. Амелькин В.В., Лукашевич Н.А., Садовский А.П. **1982**. *Нелинейные колебания в системах второго порядка*. Минск: Изд-во БГУ, 208 с.
7. Лашина Е.А., Чумаков Г.А., Чумакова Н.А. **2005**. Максимальные семейства периодических решений кинетической модели гетерогенной каталитической реакции. *Вестник НГУ. Серия: Математика. Механика. Информатика*, 5(4): 42–59. URL: <https://www.mathnet.ru/rus/vngu219> (дата обращения 13.02.2025).
8. Чумаков Г.А. **2007**. Динамика нелинейной системы дифференциальных уравнений. *Сибирский математический журнал*, 48(5): 1180–1195.
9. Потапов В.И. **2011**. О бифуркациях в динамической системе Чумакова–Слинько. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, 2(1): 146–155.
10. Mukherjee S., Basu A. **2022**. Statistical mechanics of phase transitions in elastic media with vanishing thermal expansion. *Physical Review E*, 106, 054128. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.054128>
11. Глячев В.Б., Ушко Д.С. **2024**. Поведение решений динамической системы, моделирующей плоскую упругую среду в рамках теории Гинзбурга–Ландау. *Труды Физического общества Республики Адыгея*, 29: 20–25. <https://trudy.fora01.ru/files/344/3-2024.pdf> (дата обращения 13.02.2025).

References

1. Makovetsky V.I., Dudchenko I.P., Zakupin A.S. **2017**. Autooscillation model of microseism's sources. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 1(4): 37–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.4.037-046>
2. Selkov E.E. **1967**. [On the possibility of self-oscillations in enzyme reactions with substrate and productive repression]. In: [*Oscillatory processes in biological and chemical systems: Proceedings of the All-Union symposium on oscillatory processes in biological*

- chemical systems*], Pushchino-na-Oke, March 21–26, 1966. Moscow: Nauka, p. 93–112. (In Russ.).
3. Andronov A.A., Leontovich E.A., Gordon I.I., Maier A.L. **1973**. *Qualitative theory of second-order dynamic systems*. New York, Toronto: John-Wiley, 548 p. (In Engl., Russ.). URL: <https://archive.org/details/qualitativetheor0000unse/page/n9/mode/2up> (accessed 28.11.2024).
 4. Frommer M. **1928**. Die Integralkurven einer gewöhnlichen Differentialgleichung erster Ordnung in der Umgebung rationaler Unbestimmtheitsstellen. *Mathematische Annalen*, 99(1): 222–272. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-41390-6>
 5. Bautin N.N., Leontovich E.A. **1976**. [*Methods and techniques for qualitative research of dynamical systems on a plane*]. Moscow: Nauka, 496 p. (In Russ.).
 6. Amelkin V.V., Lukashevich N.A., Sadovsky A.P. **1982**. [*Nonlinear oscillations in second-order systems*]. Minsk: Publ. house of the BSU, 208 p. (In Russ.).
 7. Lashina E.A., Chumakov G.A., Chumakova N.A. **2005**. Maximal families of periodic solutions in a kinetic model of heterogeneous catalytic reaction. *Vestnik Novosibirskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya Matematika, Mekhanika, Informatika*, 5(4): 42–59. (In Russ.). URL: <https://www.mathnet.ru/rus/vngu219> (accessed 13.02.2025).
 8. Chumakov G.A. **2007**. Dynamics of a system of nonlinear differential equations. *Siberian Mathematical Journal*, 48(5): 949–960. <https://doi.org/10.1007/s11202-007-0098-x>
 9. Potapov V.I. **2011**. On bifurcations in dynamical Slinko-Chumakov system. *Bulletin of the Nizhny Novgorod Lobachevsky University*, 2(1): 146–155. (In Russ.).
 10. Mukherjee S., Basu A. **2022**. Statistical mechanics of phase transitions in elastic media with vanishing thermal expansion. *Physical Review E*, 106, 054128. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.054128>
 11. Tlachev V.B., Ushkho D.S. **2024**. The behavior of dynamical system solutions modeling a flat elastic medium in the framework of the Ginzburg–Landau theory. *Works of the Adygheya Republic Physical Society*, 29: 20–25. (In Russ.). URL: <https://trudy.fora01.ru/files/344/3-2024.pdf> (accessed 13.02.2025).

Об авторах

Тлячев Вячеслав Бесланович (<https://orcid.org/0000-0001-6431-316X>), доктор физико-математических наук, доцент, кафедра теоретической физики, Адыгейский государственный университет, Майкоп, Россия, tlyachev@adygnet.ru

Ушко Дамир Салихович (<https://orcid.org/0000-0002-1311-5785>), кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра математического анализа, Адыгейский государственный университет, Майкоп, Россия, damirubyh@mail.ru

About the Authors

Tlachev, Vyacheslav B. (<https://orcid.org/0000-0001-6431-316X>), Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of theoretical physics, Adyghe State University, Maykop, Russia, tlyachev@adygnet.ru

Ushkho, Damir S. (<https://orcid.org/0000-0002-1311-5785>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of mathematical analysis, Adyghe State University, Maykop, Russia, damirubyh@mail.ru

Поступила 24.02.2025

Принята к публикации 06.03.2025

Received 24 February 2025

Accepted 6 March 2025

© Автор, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.21

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.073-091>
<https://www.elibrary.ru/hwyzwe>

Эксплозивная активность вулкана Атсонупури в позднем голоцене (о. Итуруп, Южные Курильские острова): предварительные результаты

А. В. Дегтерев

E-mail: d_a88@mail.ru

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

Резюме. Представлены первые результаты изучения позднеголоценовой активности влк. Атсонупури (о. Итуруп, Южные Курильские острова), полученные в ходе полевых работ 2013–2014 гг. На основе тефрохронологических исследований и радиоуглеродного датирования установлено, что в интервале 1400–800 лет назад зафиксировано по меньшей мере 4 крупных эксплозивных (эксплозивно-эффузивных) извержения (отдельных мощных извержений или серии сближенных по времени извержений). После периода напряженной эксплозивной активности вулкана последовал период покоя, начавшийся примерно 500–600 л.н. и продолжающийся до настоящего времени, что подтверждается отсутствием задокументированных извержений в историческое время. Вещественный состав ювенильной тефры влк. Атсонупури, представленной преимущественно шлаками, отвечает умеренно- и низкокалийевым базальтам и андезибазальтам. Основываясь на полученных данных, можно полагать, что в случае возобновления активности вулкана вероятны не только терминальные (субтерминальные) извержения, но и побочные прорывы.

Ключевые слова: Итуруп, вулкан Атсонупури, тephра, голоцен, радиоуглеродное датирование, эксплозивные извержения, вулканическая активность

Late Holocene explosive activity of the Atsonupuri volcano (Iturup Island, Southern Kuril Islands): preliminary results

Artem V. Degterev

E-mail: d_a88@mail.ru

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

Abstract. The first results of the study of Late Holocene activity of the Atsonupuri volcano (Iturup Island, Southern Kuril Islands) obtained during field work in 2013–2014 are presented. On the basis of tephrochronological studies and radiocarbon dating, it was established that at least 4 large explosive (explosive-effusive) eruptions (individual major eruptions or series of eruptions close in time) were recorded in the interval 1400–800 years ago. The period of intense explosive activity of the volcano was followed by a period of quiescence beginning around 500–600 BP and continuing to the present, as evidenced by the lack of documented eruptions in historical time. The material composition of the juvenile tephra of the Atsonupuri volcano, represented mainly by cinder, corresponds to moderate- and low-potassium basalts and andesite-basalts. Based on the data obtained, it can be assumed that in case of renewed activity of the volcano not only terminal (subterminal) eruptions but also side eruptions are probable.

Keywords: Iturup, Atsonupuri volcano, tephra, Holocene, radiocarbon dating, explosive eruptions, volcanic activity

Для цитирования: Дегтерев А.В. Эксплозивная активность вулкана Атсонупури в позднем голоцене (о. Итуруп, Южные Курильские острова): предварительные результаты. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 1, с. 73–91. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.073-091>; <https://www.elibrary.ru/hwyzwe>

For citation: Degterev A.V. Late Holocene explosive activity of the Atsonupuri volcano (Iturup Island, Southern Kuril Islands): preliminary results. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 1, pp. 73–91. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.073-091>; <https://www.elibrary.ru/hwyzwe>

Финансирование и благодарности

Исследования проведены в рамках НИР ИМГиГ ДВО РАН «Вулканизм Сахалина и Курильских островов: хронология, петролого-геохимические особенности, гидротермальные проявления, мониторинг вулканической активности».

Аналитические и полевые работы выполнены благодаря поддержке грантов Правительства Сахалинской области для молодых ученых в 2014 г., ДВО РАН (№ 16-I-1-039 э) и РФФИ (№ 16-35-00138 мол_а).

Автор благодарит Андрея Николаевича Кораблева, а также своих коллег из лаборатории вулканологии и вулканопасности ИМГиГ ДВО РАН за помощь в проведении полевых работ на о. Итуруп. Автор всегда будет признателен Александру Викторовичу Рыбину (1958–2024), инициатору проведения полевых вулканологических работ в труднодоступных районах Курильской островной дуги. Отдельную благодарность автор выражает рецензентам за конструктивную критику и полезные замечания, позволившие значительно улучшить качество изложения и представления данных, а также Смирнову Сергею Захаровичу (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) за консультацию по вопросам петрохимии, ряд важных замечаний и предложений.

Введение

Действующий вулкан Атсонупури, расположенный в южной части о. Итуруп, относится к числу наименее изученных вулканов Курильской островной дуги. Сведения о нем ограничены описанием морфологии вулканической постройки [1] и несколькими результатами анализа валового состава пород [2]. Планомерные геолого-вулканологические работы начала второй половины XX в. были сфокусированы в основном на вулканах северного и центрального Итурупа, вулканы же южной части острова (Стокап, Атсонупури, Берутарубе) оказались практически не затронуты исследованиями. В определенной мере это было обусловлено и тем, что на протяжении исторического времени вулканы этого района находились в состоянии покоя.

В 2013–2014 гг. в южной части о. Итуруп проведены полевые исследования кальдерообразующего извержения Львиной Пасти – мощнейшего эксплозивного извержения на Курильских островах, происходившего на рубеже плейстоцена и голоцена (рук. полевого

Funding and Acknowledgements

The research was carried out within the framework of the research project of the IMGG FEB RAS “Volcanism of Sakhalin and the Kuril Islands: chronology, petrological and geochemical features, hydrothermal manifestations, and monitoring of volcanic activity”.

The analytical and field work was supported by grants from the Government of Sakhalin Oblast for young scientists in 2014, FEB RAS (No. 16-I-1-039 э), and RFBR (No. 16-35-00138 мол_а).

The author is grateful to Andrey N. Korablev and his colleagues from the Laboratory of volcanology and volcano hazard of IMGG FEB RAS for assistance in conducting field work on Iturup Island. The author is grateful to Alexander V. Rybin (1958–2024), the initiator of volcanological field work in hard-to-reach areas of the Kuril island arc. The author would like to express his special gratitude to the Reviewer for constructive critique and for helpful comments that significantly improved the quality of the paper and data representation, and to Sergey Z. Smirnov (IGM SB RAS, Novosibirsk) for his advice on petrochemistry and a series of important comments and suggestions.

отряда – к.г.-м.н. А.В. Рыбин). Дополнительно были выполнены рекогносцировочные работы по изучению голоценовой активности влк. Атсонупури, первые результаты которых представлены в настоящей публикации.

Материалы и методы исследований

Для реконструкции голоценовой эксплозивной активности влк. Атсонупури изучен разрез почвенно-пирокластического чехла № 9/14, вскрытого в уступе размыва южной части зал. Одесский, в 4.7 км к востоку от вершины вулкана (рис. 1 а, б). Для определения возраста и вещественного состава продуктов извержений проведено детальное опробование и описание обнажения. Абсолютный возраст определен радиоуглеродным методом на факультете географии и геоэкологии Санкт-Петербургского государственного университета. В качестве материала для радиоуглеродного анализа использовались отложения погребенных почв. Для пересчета радиоуглеродных дат

в календарные применялась калибровочная программа «OxCal» (калибровочная кривая «IntCal 13» ([3]; <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html>). Также в нескольких точках по периметру вулканической постройки проведено опробование лавовых потоков влк. Атсонупури и тефры его побочного шлакового конуса (рис. 1). Кроме того, из прибрежных дюн центральной части зал. Одесский (рис. 1, точка 4) были отобраны образцы шлаков (материалы А.В. Рыбина), образующие здесь два мощных, хорошо выраженных горизонта: их источником мог являться как влк. Атсонупури, так и влк. Стокап, поскольку шурф, в котором они были вскрыты, располагался ровно посередине между этими двумя вулканами (~9 км).

Химический состав образцов, представленных отложениями тефры и лавы (анализировались свежие ювенильные шлаки и лавы без следов вторичных изменений), изучался в аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (г. Владивосток). Содержания H_2O , п.п.п., SiO_2 определены методом гравиметрии, FeO – методом титриметрии; остальных элементов – методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре iCAP 7600 Duo (Thermo Scientific Corporation, США), свидетельство о поверке № 001434 от 17 ноября 2015 г. Пробоподготовка к инструментальному анализу – открытое кислотное разложение ($HNO_3 + HClO_4 + HF$).

Общие сведения о вулкане Атсонупури

Вулкан Атсонупури (абс. выс. 1205 м), расположенный в южной части о. Итуруп (в ~75 км к юго-западу от г. Курильск), образует одноименный полуостров, который разделяет акватории заливов Одесский (на севере) и Доброе Начало (на юге) и соединяется с островом низким (абс. выс. 20–30 м) перешейком (рис. 1 а, б). Из-за подобной изолированности вулкан и получил свое современное название –

«Атсонупури» с айнского языка переводится как «противостоящая гора» (т.е. расположенная напротив острова) [4].

Первые сведения о геологическом строении влк. Атсонупури содержатся в фундаментальных работах Г.С. Горшкова [1, 5], который установил, что вулкан, как и многие современные вулканические аппараты Курильской островной дуги, построен по типу «Сомма-Везувий» (рисунки 1 б, 2). Однако его основные структурные элементы выражены не так ярко, как, например, на вулканах Пик Креницына (о. Онекотан, Северные Курилы) и Тятя (о. Кунашир, Южные Курилы), являющихся эталонами вулканических построек подобного типа. Постройка старого вулкана (сомма), представляющая собой стратовулкан с диаметром основания ~5 км, наилучшим образом выражена в восточном и юго-восточном секторах (рис. 2). При наблюдении с северо-запада Атсонупури имеет вид одиночного стратовулкана, не осложненного вершинной кальдерой с молодым внутренним конусом. «Сомма» выглядит довольно свежо и практически не затронута эрозией, что позволяет сделать вывод о ее сравнительно молодом возрасте – вполне вероятно, что образовалась она в позднем плейстоцене – голоцене. Ее гребень, имеющий вид подковы, открытой на запад, наиболее четко выражен в восточном секторе, где достигает максимальной высоты, постепенно понижаясь в западном направлении. По всей видимости, западная часть постройки была разрушена секторным обвалом (Г.С. Горшков [1] выделял здесь сброс северо-западного простирания), сопряженным с формированием вершинной кальдеры* диаметром ~1.8 км.

В пределах вершинной кальдеры расположена постройка молодого вулкана, представляющего собой относительно небольшой (280–300 м) стратовулканический конус. Его вершина увенчана кратером размером 500 × 400 м, вытянутым на северо-восток (рисунки 1, 2). В северо-западном и северо-восточном направлениях от его кромки до отметки ~350–400 м н.у.м. протягиваются две крупные

* В настоящей публикации применительно к влк. Атсонупури мы используем вслед за Г.С. Горшковым [1] термин «кальдера», хотя правомерность использования подобного термина дискуссионна из-за размера и неустановленного генезиса этого объекта, и, возможно, более уместно квалифицировать его как кратер.

(~1250 × 450 м) рытвины типа «шарра», а также несколько барранкосов. Лавово-пирокластические образования внутреннего конуса почти полностью перекрывают полость кальдеры, а также значительную часть западного сектора вулканической постройки старого вулкана. На одном из участков здесь обнажается «живая» осыпь из свежих вулканических шлаков и бомб, общей протяженностью ~1850 м (от

вершины до побережья), с которой периодически скатываются фрагменты разноразмерного обломочного материала (некоторые обломки достигают в поперечнике 20–30 см и более).

По периферии постройки влк. Атсонупури расположен ряд шлаковых конусов (рис. 3 а–д), связанных с побочными извержениями, что характерно для вулканов, продуцирующих магмы основного состава (Алаид, Тятя). Постройка

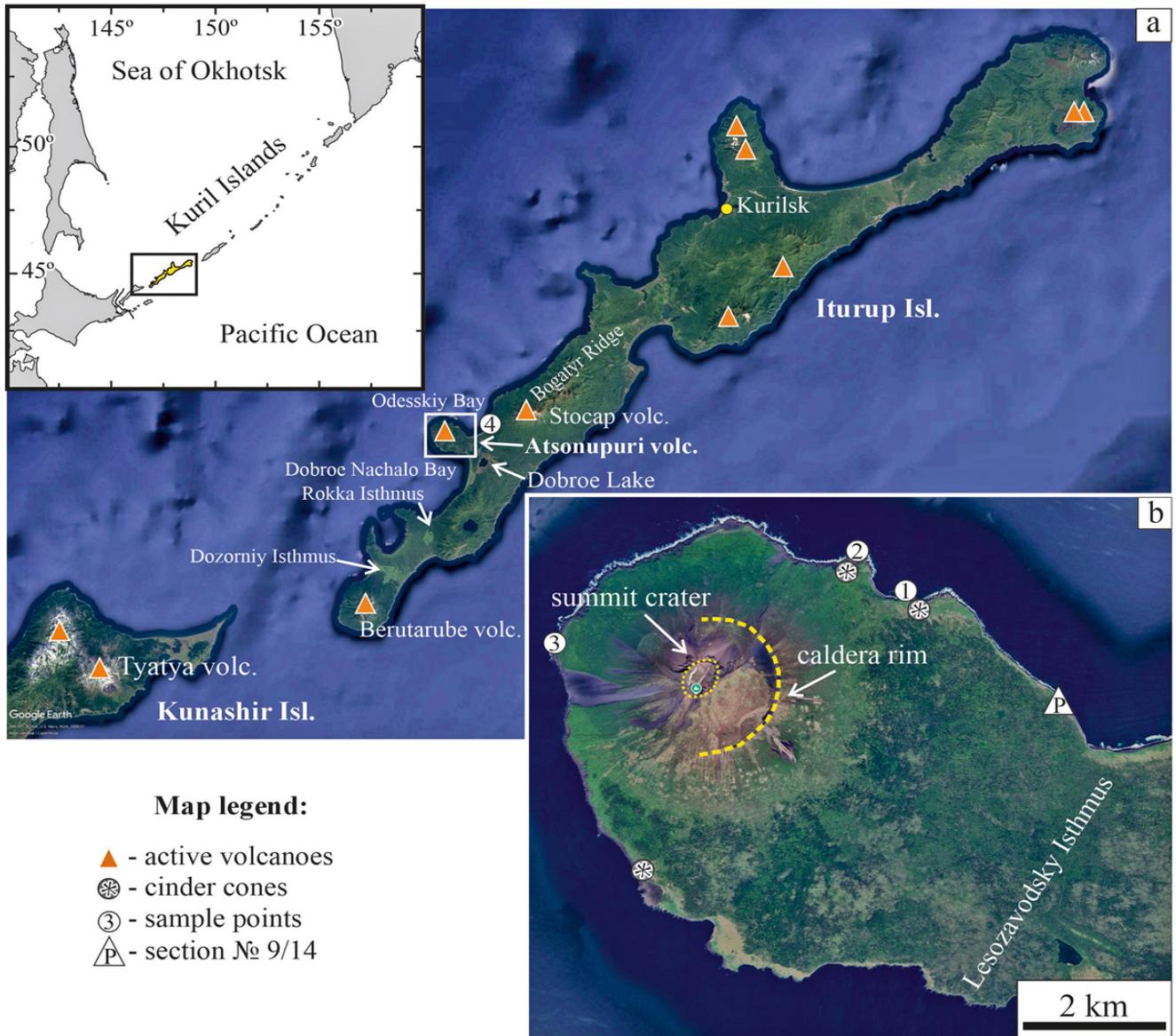


Рис. 1. Район исследований. (а) Географическое положение о. Итуруп в системе Курильской островной дуги. (б) Основные структурные элементы влк. Атсонупури и точки опробования тefры и лав: 1 – P38/13 (лава), P39/13 (шлак побочного конуса), 2 – P81/14, P82/14, P83/14, P84/14 (лава), 3 – P85/14 (лава), 4 (см. (а)) – P250/14, P251/14 (шлак из дюн). Крупным пунктиром на врезке показаны выделяющиеся в рельефе границы кальдеры, мелким – вершинный кратер. Разрез № 9/14 отмечен треугольником. Использованы снимки Google Earth.

Fig. 1. The study area. (a) Geographical position of Iturup Island in the Kuril island arc system. (b) Basic structural elements of the Atsonupuri volcano and tephra and lava sampling points: 1, P38/13 (lava), P39/13 (cinder from the side cone); 2, P81/14, P82/14, P83/14, P84/14 (lava); 3, P85/14 (lava); 4 (see (a)), P250/14, P251/14 (cinder from the dunes). Large dotted line in the inset indicates the caldera rim encountered in the relief; small dotted line indicates the summit crater. Section 9/14 is marked with a triangle. Google Earth imagery used.

первого из них расположена на побережье, в 2.7 км к восток-северо-востоку от вершины вулкана (рис. 3 а). Судя по спутниковым снимкам и фотоматериалам, полученным в ходе полевых рекогносцировочных исследований, она образована двумя слившимися шлаковыми конусами высотой 60–70 м (рис. 3 а), на вершинах которых просматриваются очертания кратеров. В ~900 м к северо-западу от первого расположен второй шлаковый конус (рис. 3 d). Его постройка не имеет четких очертаний конусовидной формы и «рельефной» вершины с кратером, однако демонстрирует характерное периклинальное залегание отложений шлака, вскрытых под воздействием волно-прибойных процессов (рис. 3 d). Еще один, третий, шлаковый конус находится в южном секторе вулканической постройки – в 2.8 к юго-юго-западу от кратера (рис. 3 b, c). Судя по их относительно хорошей сохранности, можно предположить, что их формирование происходило в среднем или позднем голоцене.

Вещественный состав пород влк. Атсонупури изучен слабо и ограничивается данными работы [2], согласно которой породы вулкана представлены базальтами и, в меньшей степени, андезибазальтами (мас.%): SiO_2 47.09–52.41, K_2O 0.42–0.59, Na_2O 1.75–2.88.

Подводя итог описанию морфологии влк. Атсонупури, следует отметить, что его по-

стройка в целом выглядит довольно молодо: она практически не тронута эрозией, имеет хорошо выраженный вершинный кратер (рис. 1 а), ряд шлаковых конусов (рис. 3 а–d), связанных с побочными извержениями, и характеризуется развитием относительно свежих продуктов активности – лав и шлаков (рис. 4 а–d). В то же время общий облик вулкана заметно отличается от наиболее активных вулканов региона, таких как Чикурачки (о. Парамушир, Северные Курилы) или Пик Сарычева (о. Ма-туа, Центральные Курилы): их почти черные, покрытые плащом свежих шлаков конусы совершенно лишены растительности, что указывает на постоянную эруптивную активность, в условиях которой устойчивый почвенно-растительный покров не успевает сформироваться [6]. Вулкан Атсонупури, напротив, практически до вершины (частично и кратер) покрыт почти сплошными зарослями из молодого бамбучника, ольхового кустарника и травянистой растительности. Таким образом, Атсонупури имеет вид вулкана, который был очень активен раньше, но последние 500–600 лет находится в состоянии покоя. За это время на нем успел сформироваться устойчивый почвенно-растительный покров. Это согласуется с отсутствием сведений о проявлениях активности вулкана в историческое время. Итуруп всегда был

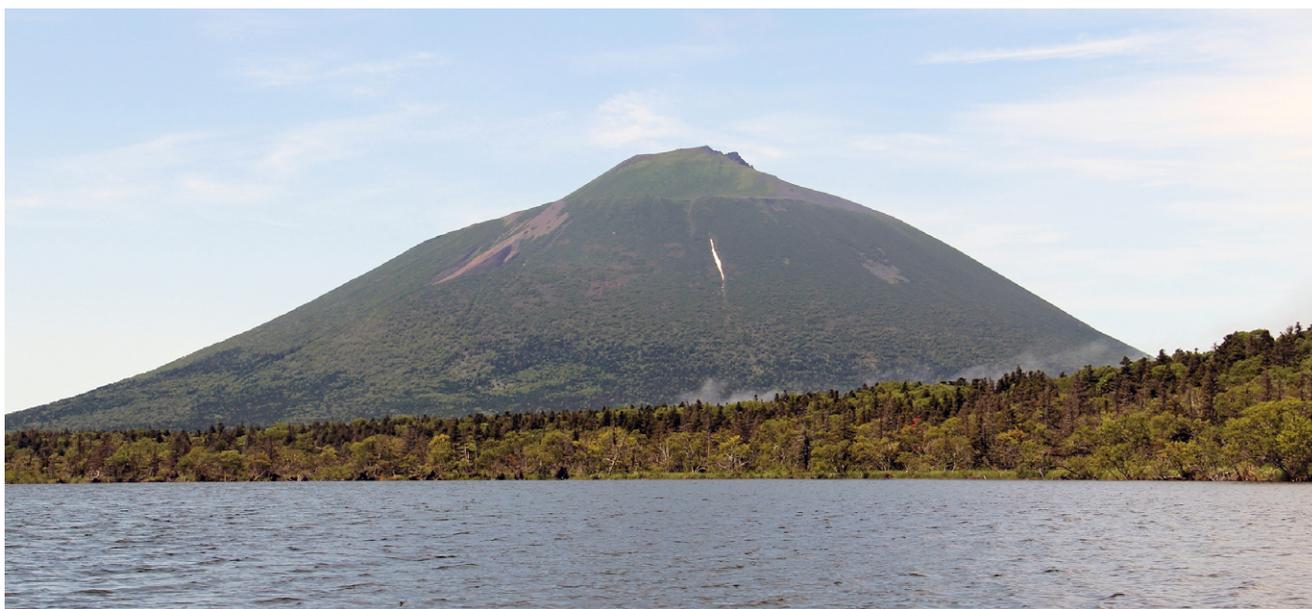


Рис. 2. Вулкан Атсонупури, вид с юго-востока (район оз. Лесозаводское), июль 2014 г. Фото А.В. Дегтерева

Fig. 2. The Atsonupuri volcano, view from the southeast (Lesozavodskoye Lake area), July 2014. Photo by A. Degterev



Рис. 3. Шлаковые конусы в восток-северо-восточном (a, d) и юго-юго-западном (b, c) секторах подножья влк. Атсонупури. На врезке показано географическое положение шлаковых конусов в соответствии с буквенной нумерацией фотоснимков. Фото А.В. Дегтерева (a, d), В.Б. Гурьянова (b, c).

Fig. 3. Cinder cones in the east-northeast (a, d) and south-southwest (b, c) sectors at the foot of the Atsonupuri volcano. The inset shows the geographical position of the cinder cones according to the letter numbering of the photographs. Photos by A. Degterev (a, d) and V. Guryanov (b, c).

наиболее заселенным островом Курильской гряды, поэтому маловероятно, что происходившие извержения и/или их последствия могли оставаться незамеченными.

В работах [1, 5] сообщается об извержениях вулкана в 1812 (?) и 1932 г. Событие 1812 г. упоминается в них со ссылкой на сообщение капитана П.И. Рикорда*, однако из записок В.М. Головнина [7] ясно, что речь шла о другом вулкане. 24 августа 1812 г. капитан Рикорд с борта шлюпа «Диана», стоявшего на рейде о. Шикотан, наблюдал извержение (проявление повышенной активности?) влк. Тятя на сосед-

нем о. Кунашир, о чем сообщил: «Изъ вершины Кунаширского пика, Японцами называемо-го Чачанобури (вулкан Тятя. – Прим. автора), увидѣли мы выходящій дымъ, чего въ прошломъ годѣ нами примѣчено не было» [7, с. 130].

Сведения о слабом извержении 1932 г. в доступных литературных источниках отсутствуют, информация о нем Г.С. Горшковым [1] была получена со слов местных жителей. Также сообщалось о том, что сейсмостанция «Лесозаводск», расположенная на перешейке, периодически фиксировала серии слабых землетрясений под вулканом [1]. В 2018 г.

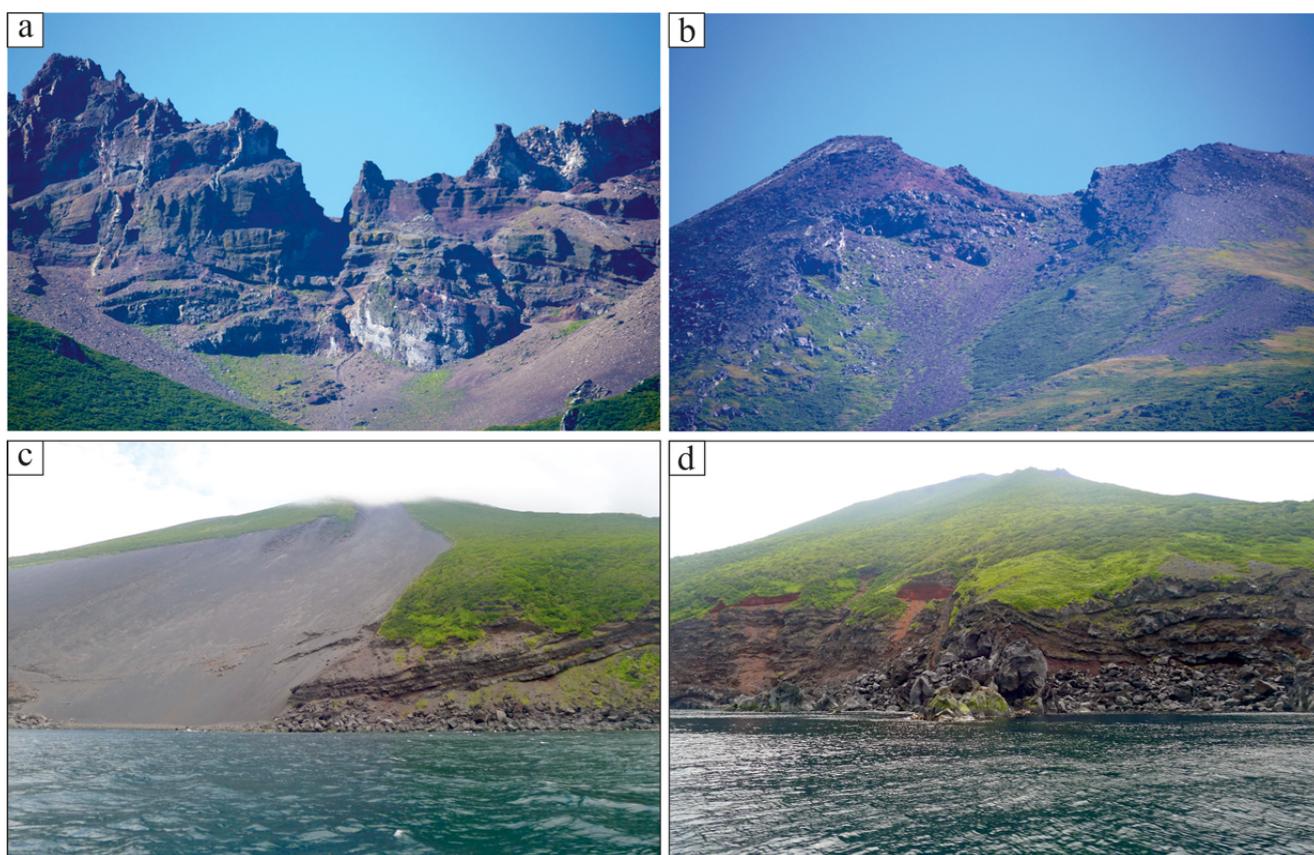


Рис. 4. Лавово-пирокластические отложения влк. Атсонупури: (а) «воротник» прикратерной зоны, образованный переслаивающимся горизонтами лав и шлаков; в левой части снимка видна серия даек (вид с северо-запада); (б) вершинная часть вулкана, юго-западный сектор; (с) шлаковая осыпь на западном склоне постройки; (д) береговые обнажения, вскрывающие структуру стратовулкана в запад-юго-западном секторе подножья: многочисленные, относительно свежие лавовые потоки чередуются с пачками пирокластики; в центре на переднем плане видно, как молодые лавово-пирокластические толщи облекают более древние эффузивные образования. Фото В.Б. Гурьянова (а, б), Н.Г. Разжигайевой (с, д).

Fig. 4. Lava and pyroclastic deposits of the Atsonupuri volcano: (a) the “collar” of the crater zone formed by interlaced horizons of lavas and cinder, with a series of dikes visible in the left part of the image (view from the northwest); (b) the summit of the volcano, southwestern sector; (c) cinder scree on the western slope of the edifice; (d) coastal outcrops revealing stratovolcano structures in the west-southwestern sector of the footwall: numerous, relatively fresh lava flows alternate with pyroclastic beds; in the centre foreground, young lava and pyroclastic sequences can be seen encasing older effusive formations. Photo by V. Guryanov (a, b), N. Razhigayeva (c, d).

* П.И. Рикорд принял командование шлюпом «Диана» после «инцидента с В.М. Головниным» в 1811 г., когда вице-адмирал был пленен японцами на о. Кунашир [7].

каких-либо проявлений газогидротермальной (сульфатарной) активности в вершинном кратере вулкана и/или на склонах его постройки не было отмечено (по устному сообщению сотрудника лаборатории вулканологии и вулканологии опасности ИМГиГ ДВО РАН Ф.А. Романюка, совершившего восхождение на вулкан с целью изучения современного состояния кратерной зоны и геоботанических исследований).

Результаты и обсуждение

В результате изучения разреза почвенно-пирокластического чехла № 9/14 (рис. 1) были получены первые данные об эксплозивной активности влк. Атсонупури в позднем голоцене (рисунки 5, 6 а, б). Большая часть тефры из этого разреза ввиду значительной крупности и мощности горизонтов заведомо считалась «местной», так как все активно действующие вулканы с аналогичным составом продуктов (низко- и умеренно-калиевые базальты и андезибазальты) находятся на значительном удалении – ближайшим потенциальным источником является влк. Тятя, расположенный в 90 км к юго-западу на о. Кунашир. Однако при проведении полевых работ по изучению кальдерообразующего извержения Львиной Пасти (2013, 2014, 2016–2017 гг.), в ходе которых изучались почвенно-пирокластические чехлы перешейков Рокка и Дозорный (рис. 1), перекрывающие кислую проксимальную пирокластику кальдеры, мощных горизонтов тефры основного состава, которые могли соотноситься с деятельностью влк. Тятя, обнаружено не было. Вулкан Берутарубе, расположенный на самом юге острова (~40 км) (рис. 1), в качестве потенциального источника позднеголоценовой тефры в пределах исследуемого района не рассматривался, так как его постройка в значительной мере эродирована, свежие продукты и вулканические формы рельефа (кратеры, взрывные воронки, лавовые потоки, пирокластические покровы) отсутствуют. Кроме того, его породы по составу значительно отличаются от продуктов извержений влк. Атсонупури [2].

Ближе всего к исследуемому разрезу расположен влк. Стокап (~12 км), который является самым высоким вулканом о. Итуруп

(абс. выс. 1634 м). Он представляет собой сложное вулканическое сооружение, состоящее из нескольких разновозрастных построек, формирующих южную часть хр. Богатырь (рис. 1). Его склоны расчленены множеством глубоких барранкосов, а привершинная часть характеризуется обилием гидротермально измененных пород. Однако на вершине расположены несколько довольно свежих кратеров и шлаковый конус к северо-востоку от главной (географической) вершины, указывающие на вероятное проявление эруптивной деятельности в голоцене. При этом современные прецизионные данные по составу его пород отсутствуют. Поэтому нельзя полностью исключать возможность присутствия его тефры в почвенно-пирокластическом чехле, окаймляющем подножье влк. Атсонупури.

Принадлежность исследуемой тефры к влк. Атсонупури подтверждается геохимическим «родством» его изверженных пород, предполагающим тождество составов тефры (шлаков и пеплов, заключенных в почвенно-пирокластическом чехле подножья вулкана) и лавовых потоков, опробованных на периферии вулканического конуса (на основе данных как по петрогенным окислам, так и по микро- и редкоземельным элементам; см. таблицу в приложении).

Тефра влк. Атсонупури представлена отложениями черных и темно-коричневых шлаков и грубых пеплов (вулканических песков), образующих горизонты различной крупности и мощности (рис. 6 б). Преобладают относительно мощные (≤ 10 см) горизонты тефры из вулканического гравия и лапиллей с примесью разнозернистых пеплов, образующие как отдельные слои, так и мелко стратифицированные пачки (рис. 5), отвечающие продолжительным и, вероятно, очень мощным периодам эксплозивной активности (или серии сближенных по времени извержений). Некоторые слои характеризуются наличием нормальной или обратной градиционной слоистости. Большинство из них образованы ювенильным материалом, но в ряде пачек присутствует примесь резургентной «дробленки» (рис. 6). Структура обломков микропорфировая или афировая с вкрапленниками плагиоклаза (~20 %). Породообразующие минералы пред-

ставлены плагиоклазом, орто- и клинопироксеном, оливином, титаномagnetитом.

Ряд горизонтов, учитывая мощность и крупность материала, мог быть связан с извержениями побочных конусов, расположенных по периферии влк. Атсонупури (рисунки 1, 3). Однако проследить изменение мощностей слоев тефры от разреза к разрезу по мере удаления/приближения к источнику не удалось из-за вынужденных ограничений по времени.

Для определения абсолютного возраста горизонтов тефры и оценки частоты извержений влк. Атсонупури выполнено радиоуглеродное датирование погребенных почв, подстилающих отложения шлаков. Получены две радиоуглеродные датировки, соответствующие позднему голоцену: 1610 ± 50 (калиброванный возраст: 1490 ± 60 лет до 1950 г. (ЛУ-7806)) и 1050 ± 80 (кал. возраст: 970 ± 100 лет до 1950 г. (ЛУ-7828)). Кроме того, возрастным репером 1739 г.н.э. являлся пепел Та-а, связанный с плинианским извержением влк. Тарумаэ (о. Хоккайдо, Япония), повсеместно распространенный на о. Итуруп [8–13] и являющийся здесь своеобразной геологической вехой между извержениями исторического и доисторического этапов вулканической активности.

На основе изучения последовательности слоев тефры из почвенно-пирокластического чехла и радиоуглеродных датировок было установлено, что за последние 1400 лет произошло не менее четырех достаточно сильных эксплозивных (эксплозивно-эффузивных?) извержений влк. Атсонупури, оставивших

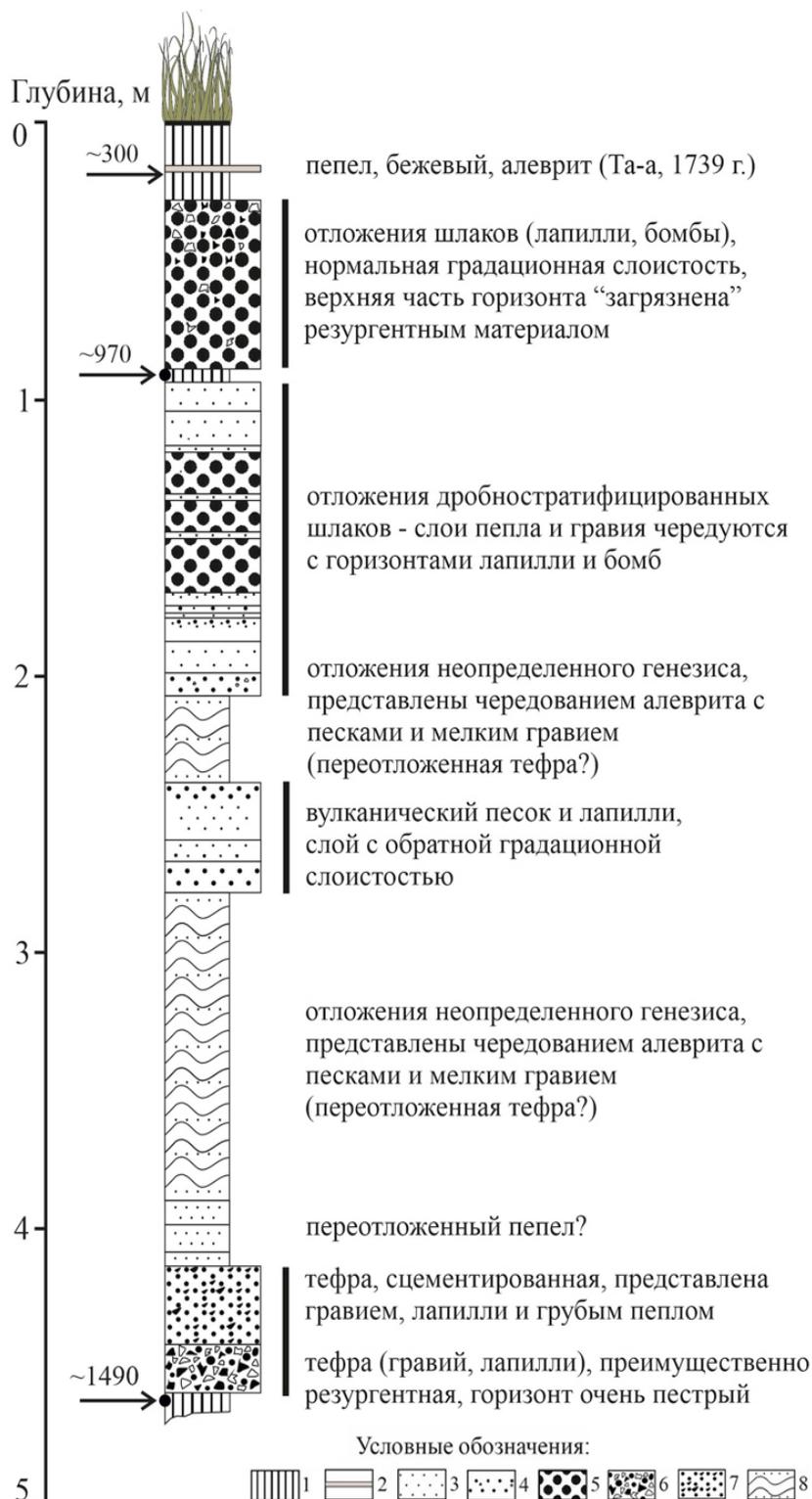


Рис. 5. Разрез почвенно-пирокластического чехла № 9/14. Цифры слева соответствуют калиброванным значениям радиоуглеродного возраста; справа приведено краткое описание отложений. Черные вертикальные линии справа от колонки отвечают отдельным сильным извержениям или этапам активизации (сближенной по времени серии извержений) эруптивной деятельности влк. Атсонупури.

Fig. 5. Section of the soil and pyroclastic cover 9/14. Numbers on the left correspond to calibrated radiocarbon ages; on the right – a brief description of sediments is given. Black vertical lines to the right of the column correspond to individual large eruptions or activation phases (series of eruptions close in time) of the Atsonupuri volcano.

геологические следы в восточном секторе вулканической постройки. Наиболее сильное из них происходило ~1100–1000 л.н. (ниже почвы с кал. возрастом 970 ± 100 лет; рис. 5), состоявшее из серии крупных эксплозивных событий, оставивших мощные пачки шлаков. Не исключено, что количество извержений было больше (до ~6–8), если отождествлять последовательные слои тефры с отдельными, сближенными по времени вулканическими событиями (этапами активизации эруптивной активности), в течение которых не успели сформироваться палеопочвы, маркирующие паузы в работе вулкана. Кроме того, наше исследование было ограничено изучением одного частного разреза, находящегося к востоку от действующего вулкана, без учета данных по другим разрезам (рис. 1), расположенным по периферии вулканической постройки.

Распределение извержений влк. Атсонупури во времени обнаруживает крайне «неравномерный» характер: абсолютно все зафиксированные в почвенно-пирокластическом чехле

эксплозивные события произошли в интервале ~1400–800 л.н., т.е. на протяжении 600 лет вулкан извергался в среднем каждые 150 лет (рис. 5). При этом, по имеющимся к настоящему времени геологическим и историческим данным, последние 500–600 лет он находился в состоянии покоя.

При проведении палеосейсмологических и палеогеографических работ в июле–августе 2022 г. [9], в ходе которых изучались торфяники и почвенно-пирокластические чехлы в 10–12 км к юго-востоку от влк. Атсонупури (район оз. Лесозаводское и протоки Тихая; рис. 1), никаких следов эксплозивных извержений за последние сотни лет не найдено. Вся обнаруженная тефра в этом районе залегала существенно ниже маркирующего пеплового прослоя Та-а (1739), отделяясь от него погребенной почвой, поэтому возраст наиболее молодых шлаков, которые потенциально могли бы ассоциироваться с активностью влк. Атсонупури, здесь не может быть меньше 400–600 лет.



Рис. 6. Общий вид разреза № 9/14. Отмечены точки отбора погребенных почв для проведения радиоуглеродного анализа, приведены лабораторный индекс и значения радиоуглеродного возраста. Фото А.В. Рыбина

Fig. 6. A general view of section 9/14. The locations of buried soil sampling for radiocarbon analysis are marked; the laboratory index and radiocarbon age are given. Photo by A. Rybin

Химический состав ювенильной пирокластической влк. Атсонупури представлен умеренно- и низкокалиевыми базальтами и андезибазальтами толеитовой серии с содержанием (мас.%): SiO_2 47.05–56.35, K_2O 0.30–0.72, Na_2O 1.99–3.35 (рис. 7 а–d; см. таблицу в приложении). Лавовые потоки относятся к тем же петрохимическим сериям (рис. 7 а–d), однако в целом они имеют меньший диапазон вариаций составов по сравнению с тефрой: SiO_2 48.86–53.47, K_2O 0.35–0.61, Na_2O 2.06–3.19 (см. таблицу в приложении). При этом по соотношению CaO ,

TiO_2 , Na_2O в зависимости от содержания SiO_2 породы вулкана образуют две группы, в каждую из которых входит как тефра, так и лава, что имеет петрогенетические причины и требует специального исследования.

Сравнение макроэлементного состава продуктов извержений влк. Атсонупури и соседних вулканов (Стокап, Берутарубе (о. Итуруп), Тятя (о. Кунашир)) обнаруживает следующие особенности. По сравнению с остальными вулканами южного Итурупа изверженные породы Атсонупури характеризуются

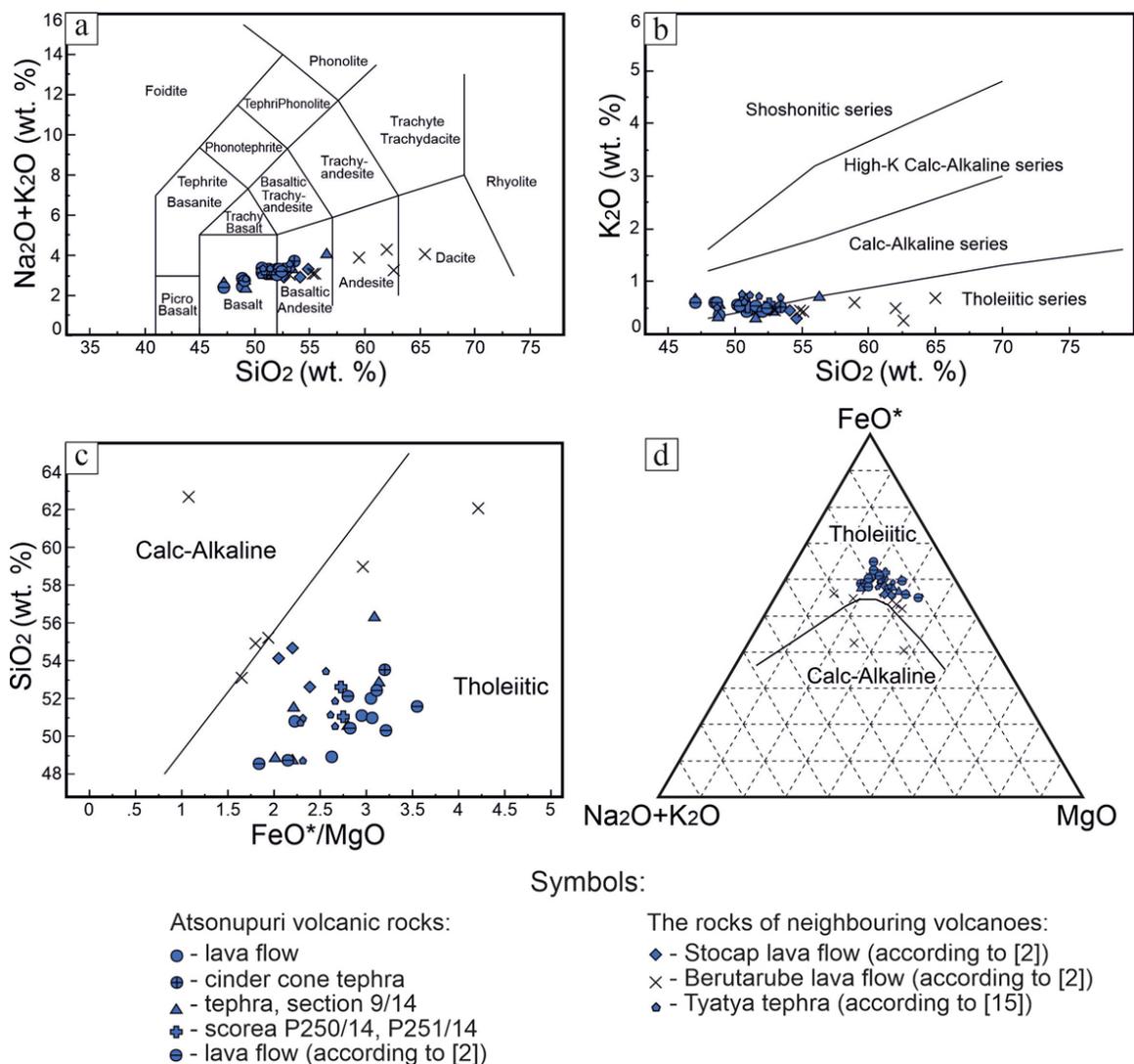


Рис. 7. Классификационные диаграммы для изверженных пород влк. Атсонупури и соседних вулканов (Стокап, Берутарубе, Тятя): (а) TAS-диаграмма ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$) в соответствии с классификацией вулканических пород [16]; (б) диаграмма $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ по [17]; (с) диаграмма $\text{SiO}_2 - \text{FeO}^*/\text{MgO}$ по [18]; (д) АФМ-диаграмма ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} - \text{FeO}^* - \text{MgO}$) по [19]. Местоположение точек отбора приведено на рис. 1.

Fig. 7. The classification diagrams for igneous rocks of the Atsonupuri volcano and neighbouring volcanoes (Stocap, Berutarube, and Tyatya): (a) TAS-diagram ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$) according to the classification of volcanic rocks [16]; (b) $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ diagram according to [17]; (c) $\text{SiO}_2 - \text{FeO}^*/\text{MgO}$ diagram according to [18]; (d) AFM-diagram ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} - \text{FeO}^* - \text{MgO}$) according to [19]. The location of the sampling points is given in Fig. 1.

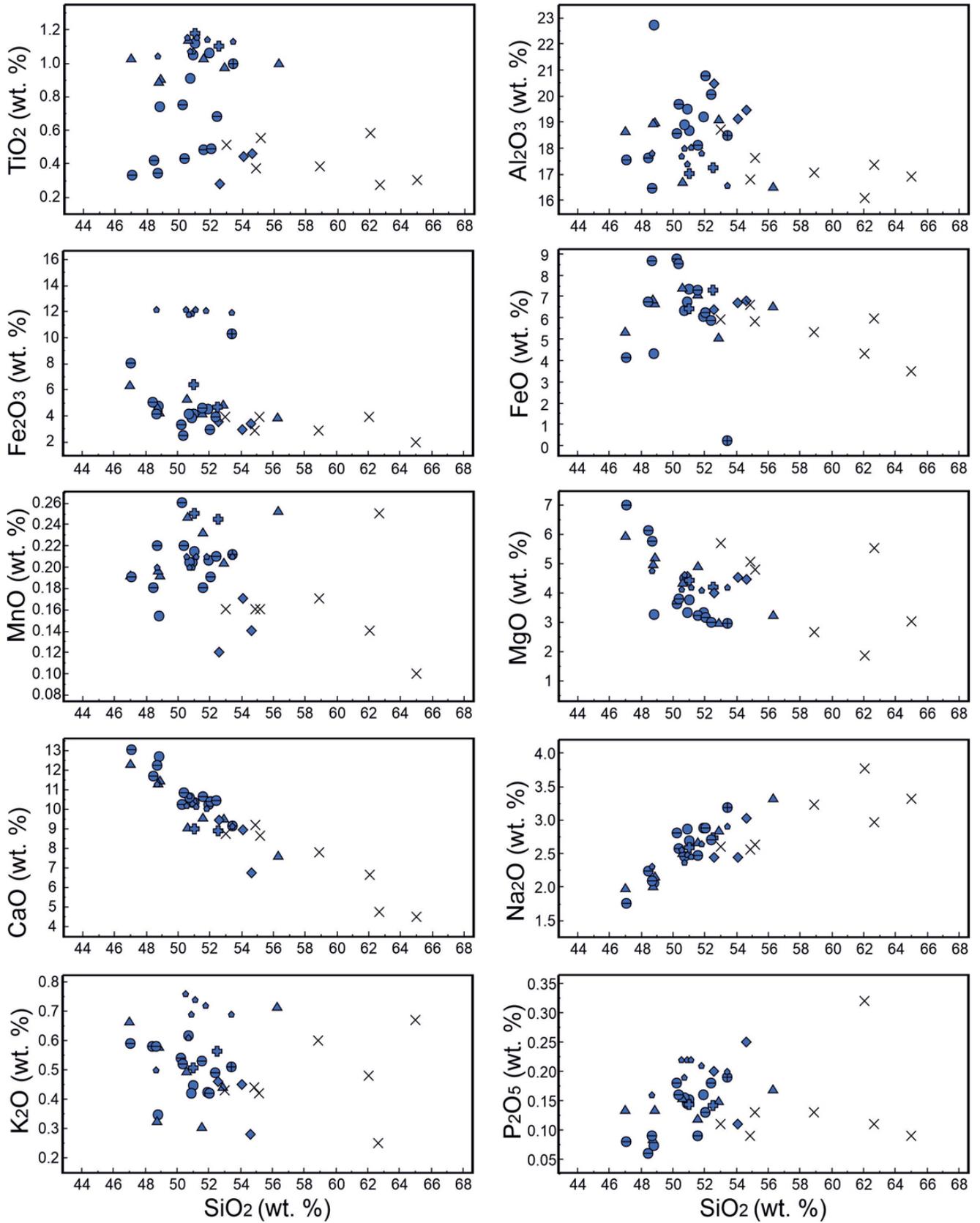


Рис. 8. Диаграммы Харкера для изверженных пород влк. Атсонупури и соседних вулканов (Стокап, Берутарубе, Тятя). Условные обозначения приведены на рис. 6.

Fig. 8 Harker diagrams for igneous rocks of the Atsonupuri volcano and neighbouring volcanoes (Stokap, Berutarube, and Tyatya). The symbols are given in Fig. 6.

наиболее низким содержанием SiO_2 и K_2O (рис. 7), повышенными содержаниями FeO , TiO_2 , CaO , MnO (рис. 8). Явно прослеживающиеся по данным работы [2] на вариационных диаграммах (рис. 8) пониженные значения TiO_2 в породах Стокапа, Атсонупури и Берутарубе, вероятно, связаны с аналитической ошибкой определения этого элемента.

Для продуктов извержений влк. Атсонупури характерно накопление Al_2O_3 по мере увеличения содержания SiO_2 , в то время как большинство пород при близкой концентрации MgO имеет тенденцию к уменьшению концентраций глинозема (это видно по составам лавовых потоков влк. Берутарубе, которые образуют более длинную серию, чем эффузивы влк. Стокап (рисунки 7, 8)). На диаграммах Харкера тефра и лавы влк. Атсонупури демонстрируют определенное сходство с изверженными породами

вулканов Стокап и Тятя (рис. 8). Высокое содержание CaO сближает породы Атсонупури с изученными продуктами извержения Стокапа. Однако недостаточное количество аналитических данных в отношении глинозема не позволяет говорить о систематическом сходстве составов этих вулканов. Существенные петрохимические отличия от всех вышеназванных вулканов имеет влк. Берутарубе, характеризующийся наиболее кислым составом лав, часть которых отвечает известково-щелочной серии (рис. 7 a–d). Это следует учитывать при проведении тефрохронологических работ и поиске потенциальных источников тефры в данном районе.

Спектры распределения нормированных значений редкоземельных и микроэлементов в изверженных породах влк. Атсонупури имеют характерный для островодужных вулканитов профиль кривой (рис. 9 a–d).

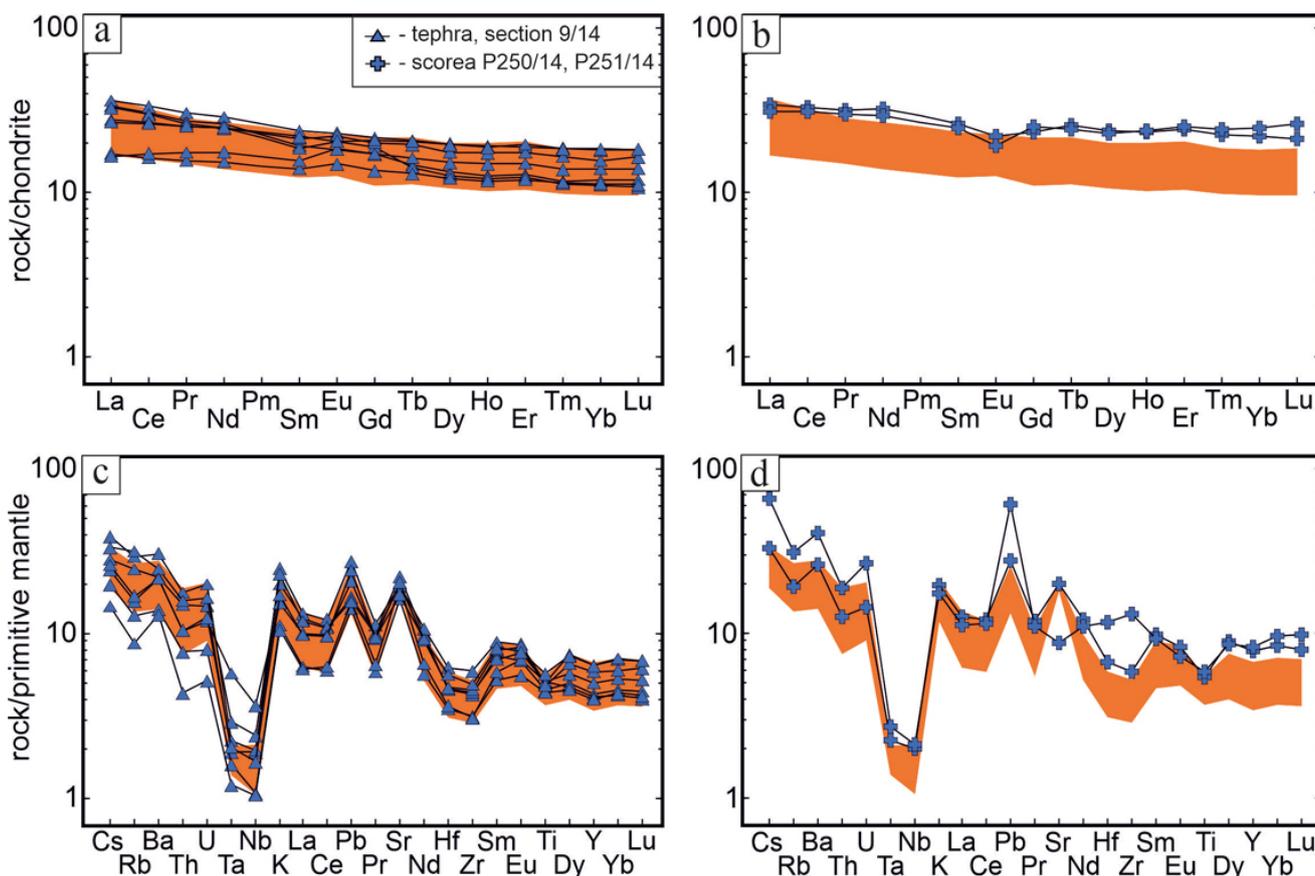


Рис. 9. Спектры распределения редкоземельных (a, b) и микроэлементов (c, d) в изверженных породах влк. Атсонупури, нормализованные к хондриту (a) [20] и примитивной мантии (b) [21], соответственно. Заливкой кирпичного цвета выделены области, соответствующие составам лавовых потоков влк. Атсонупури.

Fig. 9. The distribution spectrums of rare earths (a, b) and trace-elements (c, d) in the igneous rocks of the Atsonupuri volcano normalised to chondrite (a) [20] and primitive mantle (b) [21], respectively. The brick-coloured fill corresponds to the composition of the lava flows of the Atsonupuri volcano.

Образцы тефры из разреза № 9/14 и лавовых потоков влк. Атсонупури обнаруживают практически полную идентичность составов в отношении содержания элементов-примесей (рис. 9 а, с), что является одним из свидетельств единства их магматического источника. Образцы шлаков P250/2014 и P251/2014 из дюнного комплекса зал. Одесский (рис. 1, точка 4), напротив, заметно отличаются от нормированных значений тефры из разреза № 9/14

и лав влк. Атсонупури. Для них характерно наличие слабой отрицательной европиевой аномалии, более высокие концентрации тяжелых лантаноидов и высокозарядных элементов (рис. 9 b, d). На вариационных диаграммах зависимости концентраций Pb, Y, Sc (г/т) от содержания SiO₂ (мас.%) фигуративные точки образцов шлаков P250/2014 и P251/2014 также заметно отделены от состава тефры и лав влк. Атсонупури (рис. 10). Полученные данные указывают на то, что источником этих шлаков мог являться влк. Стокап (рис. 1). Для проверки этого предположения необходимо проведение дополнительных работ в этом районе.

Заключение

За историческое время на влк. Атсонупури достоверно не зафиксировано ни одного извержения. На основе тефростратиграфических и радиоизотопных исследований разреза почвенно-пирокластического чехла в восточном секторе вулканической постройки отмечено по меньшей мере четыре крупных эксплозивных (эксплозивно-эффузивных?) извержения (или серии сближенных по времени извержений), происходивших в интервале 1400–800 л.н.

После периода интенсивной эксплозивной активности вулкана последовал период покоя, начавшийся примерно 500–600 л.н. и продолжающийся, вероятно, до текущего момента, что подтверждается отсутствием сведений о задокументированных извержениях в историческое время. Составить объективный долгосрочный прогноз активности вулкана на основе имеющихся предварительных данных невозможно. К тому же нет точных данных о длительности и цикличности пауз в деятельности вулкана (предыдущий период активности вулкана длился порядка 600 лет, внутри которого перерывы между извержениями составляли приблизительно от нескольких десятков до сотен лет). Это следует учитывать при проведении мониторинга вулканической активности на Курильских островах. В случае активизации вулкана, учитывая эксплозивный характер его деятельности, потенциальные извержения могут представлять угрозу для ави-

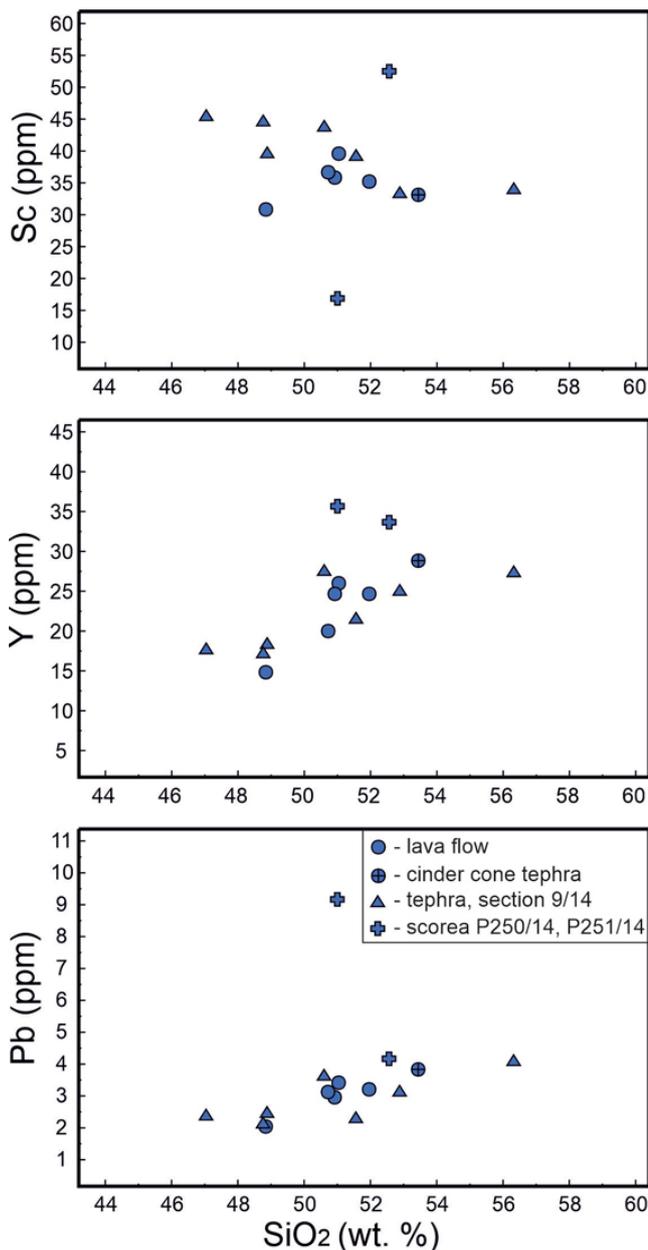


Рис. 10. Вариации концентраций Sc, Y, Pb (г/т) в зависимости от содержания SiO₂ для изверженных пород влк. Атсонупури.

Fig. 10. The variations of Sc, Y, and Pb concentrations (g/t) according to the SiO₂ content for igneous rocks of the Atsonupuri volcano.

ации и морских судов. При этом вероятны не только терминальные (субтерминальные) извержения, но и побочные прорывы.

Вещественный состав ювенильной пирокластики влк. Атсонупури представлен умеренно- и низкокальциевыми базальтами и андезитобазальтами толеитовой серии с содержанием SiO_2 47.05–56.35, K_2O 0.30–0.72, Na_2O 1.99–3.35 мас.%. Лавовые потоки относятся к тем же петрохимическим сериям, но имеют меньший диапазон вариаций составов по сравнению с тефрой (SiO_2 48.86–53.47, K_2O 0.35–0.61, Na_2O 2.06–3.19 мас.%). В целом продукты активности вулкана отличаются разнообразием и неординарностью вариаций составов, необычностью трендов эволюции.

Представленные в настоящем сообщении результаты основаны на ограниченном наборе данных и лишь в первом приближении позволяют пролить свет на доисторическую активность и вещественный состав изверженных пород влк. Атсонупури. Для полного восстановления истории эруптивной деятельности вулкана необходимо проведение детальных палеовулканологических работ, включающих комплексные геолого-вулканологические, изотопно-геохимические исследования, затрагивающие не только данный вулканический центр, но и соседние вулканы (Стокап, Берутарубе и др.).

Список литературы

- Горшков Г.С. 1967. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 287 с.
- Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. 1989. *Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис*. М.: Наука, 239 с.
- Ramsey C., Bronk, Lee S. 2013. Recent and planned developments of the program OxCal. *Radiocarbon*, 55 (2-3): 720–730. <https://doi.org/10.1017/S0033822200057878>
- Браславец К.М. 1983. История в названиях на карте Сахалинской области. Южно-Сахалинск: Дальневост. кн. изд-во. Сах. отд-ние, 144 с.
- Горшков Г.С. 1958. Действующие вулканы Курильской островной дуги. *Молодой вулканизм СССР: Труды Лаборатории вулканологии АН СССР*, 13: 59–60.
- Гришин С.Ю. 2011. Воздействие вулканических извержений на растительный покров острова Мауа (Курильские острова). *Известия РГО*, 143: 79–89.
- Головнин В.М. 1819. *Путешествие Российского Императорского шлюпа «Диана» из Кронштадта на Камчатку, совершенное под начальством флота лейтенанта (ныне капитана 1-го ранга) Головнина в 1807, 1808 и 1809 годах*. Ч. I. СПб.: Морская типография, 240 с.
- Дегтерев А.В., Пинегина Т.К., Разжигаева Н.Г., Кожурин А.И. 2021. Голоценовая летопись вулканических извержений острова Итуруп. *Природа*, 12: 17–22. <https://doi.org/10.7868/S0032874X21120036>
- Пинегина Т.К., Разжигаева Н.Г., Дегтерев А.В., Хомчановский А.Л. 2023. По следам голоценовых сильных землетрясений острова Итуруп. *Природа*, 3: 51–57. <https://doi.org/10.7868/S0032874X23030055>
- Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Арсланов Х.А., Кайстренко В.М., Горбунов А.О., Петров А.Ю. 2017. Проблема палеореконструкций мегацунами на Южных Курилах. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 37–49.
- Nakagawa M., Hiraga N., Furukawa R. 2011. Formation of a zoned magma chamber and its temporal evolution during the historic eruptive activity of Tarumai Volcano, Japan: Petrological implications for a long-term forecast of eruptive activity of an active volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 205 (1-2): 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.05.003>
- Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Belyanina N.I., Grebennikova T.A., Ganzey K.S. 2008. Paleoenvironments and landscape history of the Minor Kuril Islands since the Late Glacial. *Quaternary International*, 179(1): 83–89. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.10.017>
- Razzhigaeva N.G., Matsumoto A., Nakagawa M. 2016. Age, source, and distribution of Holocene tephra in the southern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activities in the southern Kurile arc. *Quaternary International*, 397: 63–78. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.070>
- Gill J.B. 1981. *Orogenic andesites and plate tectonics*. Berlin: Springer-Verlag, 390 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-68012-0>
- Nakagawa M., Ishizuka Y., Kudo T., Yoshimoto M., Hirose W., Ishizaki Y., Gouchi N., Katsui Y., Solovyov A.W., Steinberg G.S., Abdurakhmanov A.I. 2002. Tyatya Volcano, southwestern Kuril arc: Recent eruptive activity inferred from widespread tephra. *The Island Arc*, 11: 236–254. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1738.2002.00368.x>
- Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>

Продолжение списка литературы на с. 90.

ПРИЛОЖЕНИЕ / APPENDIX

Таблица. Химический состав (петрогенные окислы, мас.%; микро- и редкоземельные элементы, г/т) лав и тефры влк. Атсонупури
Table. Chemical composition (petrogenic oxides, wt.%; trace and rare earth elements, g/t) of lavas and tephra of the Atsonupuri volcano

Окисел, элемент	Лавы										Тефра									
	P81/2014	P83/14	P84/14	P85/14	P 38/13	P 39/13	2/9/14	9/9/14	15/9/14	20/9/14	23/9/14	39/9/14	41/9/14	P 250/14	P 251/14					
SiO ₂	51.05	51.97	50.94	50.76	48.86	53.47	48.89	56.35	47.05	48.78	51.56	52.90	50.60	52.57	51.02					
TiO ₂	1.12	1.06	1.05	0.90	0.74	0.99	0.91	1.00	1.03	0.89	1.03	0.97	1.14	1.10	1.18					
Al ₂ O ₃	18.66	19.19	19.50	18.87	22.69	18.46	19.00	16.52	18.65	18.97	18.12	19.11	16.69	17.23	17.00					
Fe ₂ O ₃	4.15	4.48	3.81	4.12	4.69	10.29	4.24	3.86	6.36	4.63	4.21	4.83	5.32	4.61	6.40					
FeO	7.31	6.03	6.71	6.29	4.30	0.21	6.66	6.54	5.35	6.86	7.09	5.06	7.42	7.27	6.38					
MnO	0.21	0.21	0.20	0.20	0.15	0.21	0.19	0.25	0.19	0.20	0.23	0.20	0.25	0.24	0.25					
MgO	3.74	3.30	3.31	4.48	3.24	2.96	5.21	3.25	5.95	5.00	4.92	3.00	4.37	4.19	4.41					
CaO	10.32	10.20	10.31	10.55	12.69	9.13	11.46	7.62	12.33	11.30	9.56	9.51	9.06	8.85	9.00					
Na ₂ O	2.69	2.87	2.86	2.45	2.06	3.19	2.16	3.33	1.99	2.01	2.68	2.84	2.52	2.72	2.59					
K ₂ O	0.44	0.42	0.42	0.61	0.35	0.51	0.58	0.72	0.67	0.33	0.30	0.44	0.49	0.56	0.51					
P ₂ O ₅	0.15	0.16	0.14	0.15	0.07	0.19	0.13	0.17	0.13	0.08	0.12	0.15	0.15	0.14	0.14					
П.л.п.	0.29	0.20	0.28	0.59	0.32	0.41	0.43	0.37	0.10	0.71	0.28	0.62	1.57	0.64	0.99					
Σ	100.21	100.19	99.61	100.10	100.22	100.11	100.14	100.06	100.14	100.14	100.20	100.18	100.12	100.18	100.12					
Li	4.92	4.53	5.69	4.05	3.53	5.26	3.91	6.75	3.82	3.57	4.04	5.83	5.00	6.82	10.55					
Be	0.45	0.44	0.44	0.39	0.24	0.56	0.44	0.50	0.48	0.35	0.37	0.50	0.38	0.56	0.47					
Sc	39.39	35.02	35.79	36.50	30.66	33.05	39.78	34.07	45.59	44.74	39.17	33.47	43.78	52.46	16.69					
V	286.1	250	247.8	282.2	268.5	164	317.3	171.8	371	347.1	225.3	199.5	262.2	268	64.8					
Cr	3.4	3.3	4.0	13.5	8.7	2.7	50.0	1.0	78.7	35.9	1.8	2.3	7.1	2.2	3.2					
Co	28.35	23.62	23.78	26.37	22.15	20.07	31.22	19.74	36.81	32.72	23.71	20.57	29.91	35.55	5.74					
Ni	6.77	6.35	5.77	14.09	8.98	4.17	16.99	1.34	25.65	11.61	1.46	4.52	8.19	3.13	2.71					
Cu	65.94	46.61	51.22	43.75	49.96	47.24	69.76	63.93	75.14	68.92	14.49	42.45	55.28	68.59	15.42					
Zn	86.30	80.47	80.06	79.23	66.31	82.92	80.25	105.88	73.96	81.53	77.92	79.46	97.77	119.8	115.3					
Ga	18.96	18.57	18.66	18.49	19.61	18.26	18.90	18.86	18.42	19.04	16.91	18.28	18.77	21.88	14.01					
As	3.07	2.84	3.13	2.76	3.44	4.70	2.97	3.56	3.16	3.47	3.05	4.65	3.07	3.62	3.79					
Rb	8.64	8.14	8.17	15.85	8.39	9.81	14.77	17.56	18.96	7.73	5.26	9.45	10.13	11.63	18.63					
Sr	363.0	376.2	384.3	392.5	412.1	390.0	442.6	386.8	397.9	324.4	392.9	406.9	343.3	395.4	175.0					

Окисел, элемент	Лавы					Тэфра									
	Р81/2014	Р83/14	Р84/14	Р85/14	Р 38/13	Р 39/13	2/9/14	9/9/14	15/9/14	20/9/14	23/9/14	39/9/14	41/9/14	Р 250/14	Р 251/14
Y	25.94	24.63	24.52	19.87	14.70	28.79	18.44	27.46	17.72	17.26	21.52	25.07	27.51	33.64	35.64
Zr	46.60	43.35	43.63	50.12	30.11	54.91	44.96	62.24	45.96	32.90	32.39	48.09	51.46	61.81	137.8
Nb	1.00	0.92	0.95	1.40	0.69	1.21	1.25	1.29	1.58	0.71	0.69	2.41	1.10	1.31	1.38
Mo	0.70	0.62	0.66	0.65	0.48	0.75	0.48	0.96	0.48	0.47	0.48	0.65	0.78	0.92	1.94
Cd	0.14	0.13	0.13	0.13	0.07	0.16	0.12	0.20	0.09	0.12	0.15	0.16	0.14	0.22	0.17
Sn	0.63	0.57	0.52	0.47	0.45	0.75	0.48	0.71	0.56	35.23	0.58	0.61	0.68	0.89	0.88
Cs	0.51	0.46	0.42	0.71	0.40	0.55	0.59	0.81	0.70	0.42	0.31	0.51	0.55	0.70	1.38
Ba	133.5	127.9	131.0	181.8	93.9	162.8	144.9	201.9	162.4	91.9	86.0	142.5	142.3	172.2	265.4
La	6.08	5.81	5.85	8.76	4.00	7.24	7.96	8.57	7.73	4.08	3.92	6.53	6.37	8.08	7.32
Ce	15.34	14.74	14.91	19.74	9.75	18.19	18.46	20.36	18.17	9.97	10.54	16.28	16.07	20.11	19.09
Pr	2.32	2.25	2.26	2.67	1.41	2.66	2.57	2.88	2.49	1.48	1.66	2.38	2.40	3.00	2.81
Nd	11.23	10.69	10.89	12.32	6.50	12.35	12.15	13.42	11.56	7.10	8.18	11.41	11.57	15.11	13.63
Sm	3.06	2.98	3.09	2.87	1.89	3.59	2.97	3.62	2.84	2.12	2.37	3.23	3.34	3.99	3.74
Eu	1.14	1.16	1.02	1.00	0.74	1.29	1.05	1.33	1.19	0.86	1.07	1.28	1.19	1.28	1.11
Gd	4.00	3.91	3.47	3.47	2.26	4.44	3.50	4.40	3.87	2.77	3.51	4.10	4.25	4.74	5.13
Tb	0.73	0.71	0.71	0.57	0.42	0.81	0.55	0.77	0.53	0.49	0.61	0.73	0.77	0.96	0.91
Dy	4.81	4.49	4.42	3.67	2.67	5.10	3.36	5.02	3.21	3.08	3.85	4.45	4.94	6.02	5.79
Ho	1.03	0.98	0.99	0.78	0.57	1.12	0.71	1.08	0.69	0.66	0.84	0.98	1.06	1.31	1.34
Er	3.10	2.87	2.89	2.23	1.73	3.38	2.11	3.12	2.06	1.97	2.47	2.88	3.25	3.96	4.12
Tm	0.45	0.41	0.41	0.34	0.25	0.47	0.30	0.47	0.29	0.29	0.35	0.42	0.47	0.57	0.62
Yb	2.87	2.62	2.74	2.22	1.63	3.10	2.00	3.06	1.87	1.92	2.35	2.64	3.13	3.73	4.23
Lu	0.43	0.41	0.39	0.33	0.24	0.47	0.30	0.46	0.27	0.28	0.35	0.41	0.46	0.54	0.66
Hf	1.44	1.34	1.33	1.45	0.87	1.67	1.29	1.76	1.32	0.98	1.03	1.33	1.59	1.90	3.29
Ta	0.06	0.06	0.07	0.08	0.05	0.07	0.07	0.08	0.11	0.06	0.04	0.21	0.08	0.08	0.10
W	0.13	0.11	0.13	0.14	0.15	0.18	0.15	0.18	0.16	0.10	0.08	0.19	0.15	0.18	0.41
Tl	0.04	0.05	0.04	0.07	0.02	0.02	0.04	0.09	0.05	0.03	0.04	0.06	0.04	0.06	0.18
Pb	3.41	3.20	2.94	3.09	2.02	3.83	2.48	4.12	2.39	2.14	2.33	3.13	3.64	4.16	9.13
Th	0.74	0.70	0.68	1.50	0.59	0.86	1.19	1.42	1.26	0.61	0.35	0.83	0.83	1.00	1.51
U	0.20	0.21	0.19	0.41	0.18	0.26	0.30	0.41	0.33	0.16	0.11	0.24	0.25	0.29	0.54

Примечания к таблице. Привязка образцов приводится на рис. 1. Химические анализы выполнены в аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (г. Владивосток). Определение содержания H_2O -, п.п.п., SiO_2 выполнено методом гравиметрии (аналитик В.Н. Залевская), содержания FeO – методом титриметрии (аналитик Ж.А. Щека). Содержания остальных элементов определены методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре iCAP 7600 Duo (Thermo Scientific Corporation, США), свидетельство о поверке № 001434 от 17 ноября 2015 г. (аналитики Г.А. Горбач, Е.А. Ткалина, Н.В. Хуркало). Пробоподготовка к инструментальному анализу – открытое кислотное разложение (HNO_3+HClO_4+HF) (аналитики Ю.М. Иванова, Е.В. Волкова).

Notes to the table. The samples are referenced in Fig. 1. Chemical analyses were completed in the analytical centre of the Far Eastern Geological Institute of the Far Eastern Branch of RAS (Vladivostok). The content of H_2O -, p.p.p., SiO_2 was measured by gravimetry (analyst V. Zalevskaya), FeO content was measured by titrimetry (analyst J. Shcheka). The contents of other elements were measured by atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma on spectrometer iCAP 7600 Duo (Thermo Scientific Corporation, USA), certificate of verification No. 001434 dated 17 November 2015 (analysts G. Gorbach, E. Tkalina, N. Khurkalo). Sample preparation for instrumental analysis – open acid decomposition (HNO_3+HClO_4+HF) (analysts Yu. Ivanova, E. Volkova).

Продолжение списка литературы

17. Peccerillo A., Taylor S.R. **1976**. Geochemistry of Eocene calc-alkaline rocks from Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63–81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
18. Miyashiro A. **1974**. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274: 321–355. <https://doi.org/10.2475/ajs.274.4.321>
19. Irvine T.N., Baragar W.R.A. **1971**. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
20. Sun S.S., McDonough W.F. **1989**. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London. Special Publications*, 42: 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
21. McDonough W.F., Sun S.S. **1995**. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
5. Gorshkov G.S. **1958**. Active volcanoes of the Kuril island arc. In: *Young volcanism of the USSR: Proceedings of the Laboratory of Volcanology of the USSR Academy of Sciences*, 13: 59–60. (In Russ.).
6. Grishin S.Yu. **2011**. Impact of volcanic eruptions on the vegetation cover of Maua Island (Kuril Islands). *Izvestiya RGO*, 143: 79–89. (In Russ.).
7. Golovnin V.M. **1819**. *The voyage of the Russian Imperial sloop "Diana", from Kronstadt to Kamchatka, completed under the command of the Fleet Lieutenant (now Captain 1st Rank) Golovnin in 1807, 1808 and 1809*. Pt I. St. Petersburg: Marine Printing House, 240 p. (In Russ.).
8. Degterev A.V., Pinegina T.K., Razjigaeva N.G., Kozhurin A.I. **2021**. [Holocene chronicle of volcanic eruptions on Iturup Island]. *Priroda = Nature*, 12: 17–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032874X21120036>
9. Pinegina T.K., Razzhigaeva N.G., Degterev A.V., Khomchanovsky A.L. **2023**. Following the Holocene strong earthquakes of Iturup Island. *Priroda = Nature*, 3: 51–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032874X23030055>
10. Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., Arslanov Kh.A., Kaistrenko V.M., Gorbunov A.O., Petrov A.Yu. **2017**. The problem of past megatsunami reconstructions on the southern Kurils. *Russian Journal of Pacific Geology*, 11(1): 34–45. <https://dx.doi.org/10.1134/S1819714017010079>
11. Nakagawa M., Hiraga N., Furukawa R. **2011**. Formation of a zoned magma chamber and its temporal evolution during the historic eruptive activity of Tarumai Volcano, Japan: Petrological implications for a long-term forecast of eruptive activity of an active volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 205 (1-2): 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.05.003>

References

1. Gorshkov G.S. **1967**. [*Volcanism of the Kuril island arc*]. Moscow: Nauka, 287 p. (In Russ.).
2. Fedorchenko V.I., Abdurakhmanov A.I., Rodionova R.I. **1989**. [*Volcanism of the Kuril island arc: geology and petrogenesis*]. Moscow: Nauka, 239 p. (In Russ.).
3. Ramsey C. Bronk, Lee S. **2013**. Recent and planned developments of the program OxCal. *Radiocarbon*, 55 (2-3): 720–730. <https://doi.org/10.1017/S0033822200057878>
4. Braslavets K.M. **1983**. History in names on the map of the Sakhalin region. Yuzhno-Sakhalinsk: Far Eastern Book Publ. House. Sakhalin Branch, 144 p. (In Russ.).

12. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Belyanina N.I., Grebennikova T.A., Ganzey K.S. **2008**. Paleoenvironments and landscape history of the Minor Kuril Islands since the Late Glacial. *Quaternary International*, 179(1): 83–89. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.10.017>
13. Razzhigaeva N.G., Matsumoto A., Nakagawa M. **2016**. Age, source, and distribution of Holocene tephra in the southern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activities in the southern Kurile arc. *Quaternary International*, 397: 63–78. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.070>
14. Gill J.B. **1981**. Orogenic andesites and plate tectonics. Berlin: Springer-Verlag, 390 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-68012-0>
15. Nakagawa M., Ishizuka Y., Kudo T., Yoshimoto M., Hirose W., Ishizaki Y., Gouchi N., Katsui Y., Solovyow A.W., Steinberg G.S., Abdurakhmanov A.I. **2002**. Tyatya Volcano, southwestern Kuril arc: Recent eruptive activity inferred from widespread tephra. *The Island Arc*, 11: 236–254. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1738.2002.00368.x>
16. Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. **1986**. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
17. Peccerillo A., Taylor S.R. **1976**. Geochemistry of Eocene calc-alkaline rocks from Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63–81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
18. Miyashiro A. **1974**. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274: 321–355. <https://doi.org/10.2475/ajs.274.4.321>
19. Irvine T.N., Baragar W.R.A. **1971**. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
20. Sun S.S., McDonough W.F. **1989**. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London. Special Publications*, 42: 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
21. McDonough W.F., Sun S.S. **1995**. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)

Об авторе

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

Поступила 29.12.2024

Принята к публикации 04.02.2025

About the Author

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

Received 29 December 2024

Accepted 4 February 2025

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 504.064:504.423

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.092-106>
<https://www.elibrary.ru/awwefw>

Подход к определению региональных нормативов содержания веществ двойного генезиса в морских водах побережья юго-западного Сахалина с учетом естественного гидрохимического фона

Т. Г. Коренева[@], И. В. Сырбу, А. А. Ведерникова, В. Е. Марыжихин, А. Д. Мазанова

@E-mail: korenevatg@sakhniro.vniro.ru

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

Резюме. Сохранение стабильного функционирования прибрежных морских экосистем в условиях трансформирующегося антропогенного воздействия требует объективной оценки их экологического состояния. Регламентация веществ двойного генезиса – природного и антропогенного – с использованием общероссийских нормативов предельно допустимых концентраций не всегда достоверно характеризует благополучие водных объектов. В связи с этим предложены уточнения к определению региональных нормативов содержания ряда веществ с учетом природного гидрохимического фона. На основе статистической обработки данных гидрохимического мониторинга побережья юго-западного Сахалина за 2007–2022 гг. с использованием параметрических и непараметрических методов установлено, что фоновые (природные) содержания ряда веществ двойного генезиса превышают или находятся значительно ниже общероссийских нормативов. В перечень показателей состояния вод, требующих регламентации с учетом сложившихся природно-климатических условий, включены следующие вещества – азот нитритный, азот нитратный, азот аммонийный, фосфор фосфатный, железо (общее), биохимическое потребление кислорода, фенолы и нефтепродукты. При установлении региональных нормативов более корректным для расчета фоновых концентраций отдельных веществ признано использование нижней границы квантиля порядка 0.75 ($P = 0.95$), учитывающего особенности распределений для наиболее неблагоприятных в отношении качества воды полигона и сезона года.

Ключевые слова: побережье юго-западного Сахалина, предельно допустимая концентрация (ПДК), региональный норматив, вещества двойного генезиса

An approach to determining regional standards for the concentration of natural or anthropogenic substances in the coastal waters of southwestern Sakhalin, taking into account the natural hydrochemical background

Tatyana G. Koreneva[@], Irina V. Syrbu, Anna A. Vedernikova, Vsevolod E. Maryzhikhin, Anastasia D. Mazanova

@E-mail: korenevatg@sakhniro.vniro.ru

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

Abstract. Preserving stable functioning of coastal marine ecosystems under transforming anthropogenic impact requires an objective assessment of their ecological state. Regulation of natural or anthropogenic substances using the all-Russian standards of maximum allowable concentrations does not always reliably evaluate the well-being of water bodies. Therefore, existing approaches to determining regional standards of the concentration of some substances were

clarified, taking into account the natural hydrochemical background. Based on the statistical processing of hydrochemical monitoring data of the southwestern coast of Sakhalin from 2007 to 2022, using parametric and non-parametric methods, it was established that the background concentrations of some natural or anthropogenic substances exceed or are significantly lower than the all-Russian standards. The list of indicators of water state that require regulation, taking into account the current natural and climatic conditions, includes the following substances: nitrite nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, phosphate phosphorus, iron (total), biochemical oxygen demand, phenols, and petroleum products. When establishing regional standards, it was recognized that it was more correct to use the lower quantile limit of 0.75 ($P = 0.95$) for calculating background concentrations of individual substances, which considers the distribution features for the most unfavorable testing site and season of the year in terms of water quality.

Keywords: southwestern coast of Sakhalin, maximum allowable concentration, regional standard, natural and anthropogenic substances

Для цитирования: Коренева Т.Г., Сырбу И.В., Ведерникова А.А., Марыжихин В.Е., Мазанова А.Д. Подход к определению региональных нормативов содержания веществ двойного генезиса в морских водах побережья юго-западного Сахалина с учетом естественного гидрохимического фона. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 1, с. 92–106. <https://doi.org/10.30730/grtz.2025.9.1.092-106>; <https://www.elibrary.ru/awwefit>

For citation: Koreneva T.G., Syrbu I.V., Vedernikova A.A., Maryzhikhin V.E., Mazanova A.D. An approach to determining regional standards for the concentration of natural or anthropogenic substances in the coastal waters of southwestern Sakhalin, taking into account the natural hydrochemical background. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 1, pp. 92–106. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/grtz.2025.9.1.092-106>; <https://www.elibrary.ru/awwefit>

Финансирование и благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ГНЦ РФ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (№ 076-00004-23-00).

Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам лаборатории аквакультуры беспозвоночных и водорослей Сахалинского филиала ВНИРО за помощь при выполнении экспедиционных работ. Особая благодарность начальнику отдела рыбохозяйственной экологии Департамента водных биоресурсов и среды их обитания ВНИРО Е.В. Оганесовой за ценные советы при подготовке работы.

Funding and Acknowledgements

The research was carried out within the framework of the state assignment of the State Scientific Center of the Russian Federation the Federal State Budgetary Institute “All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography” (No. 076-00004-23-00). The authors express their sincere gratitude to the staff of the Laboratory of aquaculture of invertebrates and algae of the Sakhalin Branch of the VNIRO for their assistance in carrying out the fieldwork. Special thanks go to the Head of the Fisheries Ecology Department of the Department of Aquatic Bioresources and Their Habitats at the VNIRO E. Oganeso for her valuable advice during the preparation of the study.

Введение

Для оценки состояния вод водных объектов рыбохозяйственного значения установлено, согласно Приказу Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552¹, более 1000 нормативов и предельно допустимых концентраций (ПДК_{рх}) загрязняющих веществ. Основным недостатком процедуры установления ПДК_{рх} является отсутствие критериев перехода от лабораторных моделей к водным объектам, характеризующимся региональными природными услови-

ями и особенностями состояния, что приводит к недоучету специфики функционирования экосистем и процессов взаимодействия их компонентов [1, 2]. Использование одинаковых для всей России ПДК_{рх} наиболее опасно с точки зрения ошибочных оценок в отношении веществ двойного генезиса, образующихся в природных водах как по естественным причинам, так и в результате антропогенного воздействия. Поскольку водные объекты различных природно-климатических зон и геохимических провинций характеризуются широким спек-

¹ Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (дата обращения 26.06.2024).

тром химических веществ, естественные концентрации которых часто оказываются выше ПДК_{рх}, оценка экологического состояния водных экосистем требует учета природной составляющей гидрохимического фона [3]. Кроме того, негативное воздействие на состояние водных объектов может наблюдаться при концентрациях химических веществ значительно более низких, чем ПДК_{рх}. К таковым относятся соединения биогенных элементов, активно участвующих в продукционных процессах и определяющих характер структуры и функционирования водных экосистем [4]. Происходящие в них изменения гидрохимических условий под влиянием естественных причин и человеческой деятельности могут привести к активизации процессов эвтрофирования природных вод. Поэтому нормирование содержания биогенных элементов с использованием относительно высоких общероссийских ПДК_{рх} далеко не всегда приемлемо с экологических позиций. Объективная оценка благополучия водных экосистем требует учета природных особенностей их формирования и состояния.

Для природных вод Дальневосточного региона практически повсеместно характерно повышенное содержание органических веществ, в том числе фенолов, в отдельных случаях нефтепродуктов, обусловленное в большей степени естественными процессами их продуцирования. Для поверхностных пресных вод Сахалина часто фиксируют превышающие ПДК_{рх} природные концентрации биогенных элементов, в частности азота и фосфора. Особенно высокие содержания последних наблюдаются в воде рек осенью после нереста лососевых пород рыб [4, 5]. Для морских вод побережья юго-западного Сахалина, напро-

тив, характерны низкие уровни содержания биогенных элементов в воде [6–8], и применение общероссийских ПДК_{рх} приводит к неоднозначной оценке их качества. В условиях антропогенного воздействия на побережье Сахалина при освоении и эксплуатации нефтегазовых месторождений на шельфе острова проблема объективного анализа состояния компонентов его экосистемы становится все более актуальной.

Нормирование веществ двойного генезиса, концентрации которых в природных водах отдельных геохимических провинций часто оказываются выше или ниже нормативов ПДК_{рх}, предусмотрено Методическими указаниями². Более того, требование разработки и установления региональных нормативов качества воды в рамках регулярных наблюдений за состоянием окружающей среды определено в Постановлении Правительства РФ от 13.02.2019 № 149 (п. 5, 6)³.

Цель исследования – на основе данных многолетнего мониторинга морской прибрежной акватории у юго-западного Сахалина предложить перечень нормируемых веществ двойного генезиса и подход к определению региональных нормативов их содержания с учетом естественного гидрохимического фона.

Материал и методы исследования

Объект исследования – район Татарского пролива, вызывающий большой интерес в связи с использованием его биологических ресурсов. Он расположен у юго-западного побережья Сахалина в границах координат 47.08.469° N, 142.03.267° E – 46.32.399° N, 141.48.554° E (рис. 1). Материалы исследова-

² Приказ Федерального агентства по рыболовству от 04.08.2009 г. № 695 «Об утверждении Методических указаний по разработке нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902172637> (дата обращения 07.10.2024).

³ Постановление Правительства Российской Федерации от 13 февраля 2019 года № 149 «О разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды, а также об утверждении нормативных документов в области охраны окружающей среды, устанавливающих технологические показатели наилучших доступных технологий». [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201902190010> (дата обращения 07.10.2024).

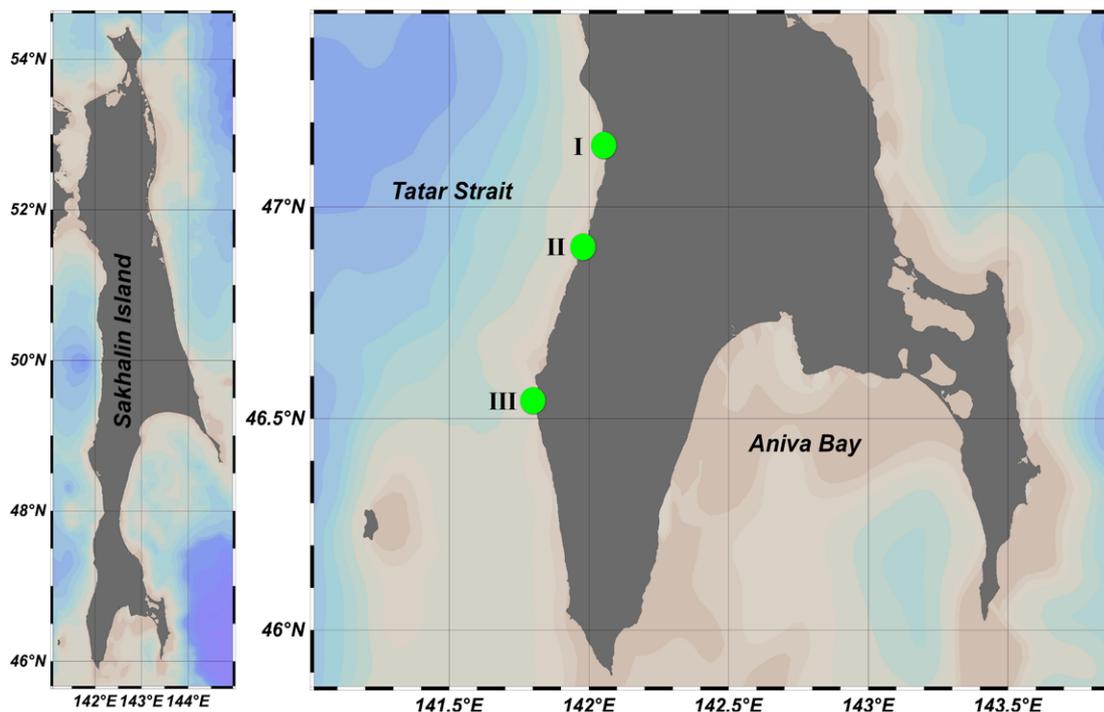


Рис. 1. Карта-схема полигонов у юго-западного побережья Сахалина: I – Антоново; II – Люблино; III – Шебунино.
 Fig. 1. Schematic map of testing sites off the southwestern coast of Sakhalin: I, Antonovo; II, Lyublino; III, Shebunino.

ния – пробы воды в количестве более 5 тыс. шт., отобранные на прибрежных полигонах в период 2007–2022 гг. в рамках гидрохимического мониторинга. Критериями выбора полигонов служили однотипность их водосборного бассейна, геоморфологического строения мелководной зоны, гидрологических условий, а также отсутствие значимых источников антропогенного загрязнения (промышленных и с/х предприятий, крупных населенных пунктов, портовой инфраструктуры и т.д.). Объем и периодичность отбора проб соответствовали требованиям Росгидромета⁴. Исследования охватывали все гидрологические сезоны, сроки наступления и продолжительность которых установлены с учетом годового хода температуры водных масс [9].

Пробы воды на каждом полигоне отбирали на трех станциях – прибрежной; внутрилагунной, расположенной на расстоянии 200–250 м от уреза воды; морской. В зависимости от глубины станции определяли количество гори-

зонтов отбора: до 1.5 м – один (поверхность); более 1.5 м – два (поверхность, дно). Отбор проб на мелководье осуществляли специально подготовленными емкостями, на глубоководных станциях – при помощи пробоотборной системы ПЭ-1420 («Экрос», Россия) с борта моторной лодки. Исследования выполняли по 20 ингредиентам на базе аккредитованной лаборатории Сахалинского филиала ВНИРО.

Выбор нормируемых веществ проводили исходя из того, соответствуют ли их природные (фоновые) концентрации нормативам для водных объектов рыбохозяйственного значения. Обнаруженные несоответствия свидетельствовали о некорректности применения ПДК_{рх} для характеристики благополучия прибрежной экосистемы. Следовательно, в данном случае региональные нормативы требовали уточнения с учетом природной составляющей гидрохимического фона. В итоговом списке оказались вещества двойного генезиса, которые включают биогенные элементы – азот

⁴ РД 52.24.622-2017 Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/555606876> (дата обращения 27.06.2024).

нитритный ($N-NO_2$), азот нитратный ($N-NO_3$), азот аммонийный ($N-NH_4$), фосфор фосфатный ($P-PO_4$), общее железо ($Fe_{\text{общ}}$), а также органические вещества (ОВ) – легко окисляемые, оцениваемые по величине биохимического потребления кислорода (БПК₅), и трудно окисляемые (фенолы и нефтепродукты (НП)). Определение массовых концентраций данных веществ в воде осуществляли с применением аттестованных методик⁵.

Статистический анализ массива данных, полученных по единым методам отбора и анализа проб, осуществляли с помощью пакета программ «MS Excel» и «Statistika 10.0». Значения, находящиеся ниже предела обнаружения методик, принимали за 1/2 от его величины. Исходные данные проверяли на нормальность распределения с помощью теста Колмогорова–Смирнова и по основным характеристикам выборки – среднему значению ($C_{\text{ср}}$), коэффициентам вариации (C_v), асимметрии (A_s) и эксцесса (Ex). Фоновые сезонные концентрации веществ для каждого полигона устанавливали по их средним значениям после исключения непоказательных экстремальных данных ($C_{0.5}$), а также по нижней границе квантиля порядка 0.75 ($C_{0.75}$) с одинаковым уровнем доверительной вероятности ($P = 0.95$). Фоновые концентрации веществ двойного генезиса в воде прибрежья у юго-западного Сахалина рассчитывали также с применением двух подходов – по верхней доверительной границе варьирования средних значений концентрации ($C_{\text{фон } 0.5}$) (согласно РД 52.24.622-2017) и по нижней границе 0.75 квантиля ($C_{\text{фон } 0.75}$) [10] для наиболее неблагоприятных в отно-

шении качества воды полигона и сезона года. Для обоснования разработки региональных нормативов (ПДК_{пер}) веществ двойного генезиса использовали принципы, основанные на учете региональных особенностей формирования и состояния водных объектов, и методы с применением непараметрических критериев оценки гидрохимической информации, изложенные в ряде работ [10–13].

Результаты исследования

Для рядов данных, сформированных по результатам гидрохимического мониторинга у побережья юго-западного Сахалина в 2007–2022 гг., рассчитали сезонные и годовые среднемноголетние статистические характеристики концентраций веществ двойного генезиса для каждого полигона и для района в целом (табл. 1). Анализ полученной информации выявил значительные пределы варьирования изученных показателей ($C_v = 71–261\%$). Проверка рядов исходных данных на нормальность показала, что функции их распределения не подчиняются нормальному закону. Отмечена значительная положительная асимметрия ($A_s = 0.32–1.14$) и остроконечный пик ($Ex = 20–84$) распределений концентрации всех ингредиентов. Их средние многолетние значения на отдельных станциях достоверно не различаются ($p < 0.05$; $n = 72–347$), на полигонах отмечено достоверное различие ($p < 0.05$; $n = 91–274$). Так, наиболее высокие концентрации биогенных элементов и нефтепродуктов в воде наблюдаются на полигоне I,

⁵ Методика измерения массовой концентрации нитритного азота и массовой концентрации нитратного азота в природных (морских и пресных) водах и очищенных сточных водах фотометрическим методом. Разраб. ФГУП «СахНИРО», св-во о метрологической аттестации методики измерений № 223.0178/01.00258/2014. Южно-Сахалинск, 2014. 27 с.; РД 52.10.772-2013 Массовая концентрация азота аммонийного в морских водах: Методика измерения фотометрическим методом в виде индофенолового синего. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200113208> (дата обращения 27.06.2024); РД 52.10.738–2010 Массовая концентрация фосфатов в морских водах: Методика измерений фотометрическим методом. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200088047> (дата обращения 27.06.2024); ПНД Ф 14.2:3:4.123-97 (ФР.1.31.2007.03796) Методика выполнения измерений биохимического потребления кислорода после n-дней инкубации (БПКполн.) в поверхностных пресных, подземных (грунтовых), питьевых, сточных и очищенных сточных водах. М.: ФГУ «ФЦАО», 2004. 15 с.; ПНД Ф 14.1:2:4.182-02 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций фенолов в пробах природной, питьевой и сточной воды на анализаторе «Флюорат-02». М.: НПО «Люмэкс», 2010. 29 с.; ПНД Ф 14.1:2:4.128-96 (М 01-05-2012) Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод на анализаторе жидкости «Флю-орат-02»). М.: НПО «Люмэкс», 2012. 25 с.; РД 52.24.358-2019 Массовая концентрация железа общего и железа валового в водах. Методика измерений фотометрическим методом с 110-фенантролином. Ростов-на-Дону: ФГБУ «ГХИ», 2019. 21 с.

Таблица 1. Статистические характеристики концентраций веществ двойного генезиса на прибрежных полигонах юго-западного Сахалина, 2007–2022 гг.
Table 1. Statistical characteristics of natural or anthropogenic substances in testing sites off the southwestern coast of Sakhalin from 2007 to 2022

Полигон	Сезон	N-NO ₂ , мкг/дм ³	N-NO ₃ , мкг/дм ³	N-NH ₄ ⁺ , мкг/дм ³	P-PO ₄ ⁻³ , мкг/дм ³	БПК ₅ , мг/дм ³	Фенолы, мг/дм ³	НП, мг/дм ³	Fe _{общ} , мг/дм ³
I	Зима	<0.5–30.70 2.26±0.46	<5.0–311.8 59.5±7.2	<20.0–114.1 45.3±3.7	<5.0–123.3 19.8±2.2	<0.5–4.22 1.42±0.14	<0.0005–0.0026 0.0005±0.0001	<0.005–0.222 0.019±0.007	<0.02–0.537 0.062±0.010
	Весна	<0.5–12.90 1.65±0.14	<5.0–654.7 51.2±7.0	<20.0–97.9 34.3±2.1	<5.0–399.1 24.0±2.3	<0.5–3.06 1.11±0.07	<0.0005–0.0020 0.0007±0.0001	<0.005–0.740 0.023±0.010	<0.02–0.591 0.093±0.009
	Лето	<0.5–14.37 1.64±0.20	<5.0–191.1 17.3±3.1	<5.0–445.2 40.4±8.7	<5.0–489.4 47.6±9.2	<0.5–4.01 1.11±0.10	<0.0005–0.0020 0.0009±0.0001	<0.005–0.180 0.016±0.004	<0.02–2.299 0.104±0.034
	Осень	<0.5–18.50 1.95±0.25	<5.0–130.5 42.0±3.5	<20.0–124.3 32.4±2.5	<5.0–45.4 13.6±1.0	<0.5–3.49 1.25±0.11	<0.0005–0.0010 <0.0005	<0.005–0.175 0.012±0.005	<0.02–1.304 0.107±0.023
	Год	<0.5–30.7 1.88±0.26	<5.0–654.7 42.5±5.2	<5.0–445.2 38.1±4.3	<5.0–489.4 26.3±3.7	<0.5–4.22 1.22±0.11	<0.0005–0.0026 0.0006±0.0001	<0.005–0.740 0.018±0.007	<0.02–2.299 0.092±0.019
II	Зима	<0.5–3.60 2.19±0.18	<5.0–147.1 34.4±6.9	<20.0–289.3 50.5±10.3	<5.0–42.1 16.4±1.9	<0.5–5.41 1.46±0.24	<0.0005–0.0020 0.0006±0.0001	<0.005–0.190 0.018±0.007	<0.02–0.150 0.041±0.007
	Весна	<0.5–5.80 1.27±0.28	<5.0–127.9 20.5±6.1	<20.0–86.0 24.8±4.0	<5.0–60.5 11.0±2.4	<0.5–7.00 1.52±0.22	<0.0005–0.0018 0.0006±0.0001	<0.005–0.112 0.018±0.004	<0.02–0.383 0.075±0.017
	Лето	<0.5–2.70 1.06±0.19	<5.0–240.4 20.9±13.1	<20.0–58.3 <20.0	<5.0–103.9 21.9±6.6	<0.5–2.80 1.82±0.14	<0.0005–0.0019 0.0008±0.0002	<0.005–0.011 0.006±0.001	<0.02–0.096 0.041±0.006
	Осень	<0.5–12.45 1.72±0.36	<5.0–106.3 36.6±7.2	<20.0–58.7 20.8±3.3	<5.0–30.5 12.8±1.6	<0.5–1.80 0.96±0.09	<0.0005–0.0012 <0.0005	<0.005–0.027 0.008±0.001	<0.02–0.158 0.051±0.008
	Год	<0.5–12.45 1.56±0.26	<5.0–240.4 28.1±8.3	<20.0–289.3 26.5±5.9	<5.0–103.9 14.9±3.1	<0.5–7.00 1.42±0.17	<0.0005–0.0020 0.0005±0.0001	<0.005–0.190 0.013±0.003	<0.02–0.383 0.052±0.010
III	Зима	<0.5–5.20 1.63±0.17	<5.0–408.8 39.7±7.5	<20.0–137.9 40.3±4.9	<5.0–239.9 16.2±3.9	<0.5–10.01 1.41±0.23	<0.0005–0.0015 <0.0005	<0.005–0.067 0.009±0.001	<0.02–0.407 0.062±0.010
	Весна	<0.5–9.49 1.42±0.20	<5.0–149.5 11.2±3.1	<20.0–85.0 28.7±2.9	<5.0–181.9 15.7±3.5	<0.5–5.02 1.44±0.13	<0.0005–0.0048 0.0007±0.0002	<0.005–0.099 0.018±0.003	<0.02–0.849 0.117±0.018
	Лето	<0.5–4.20 0.74±0.10	<5.0–27.0 <5.0	<20.0–85.1 20.5±2.7	<5.0–170.4 14.1±3.5	0.71–2.99 1.70±0.10	<0.0005–0.0023 0.0007±0.0001	<0.005–0.130 0.017±0.004	<0.02–0.598 0.083±0.015
	Осень	<0.5–9.71 1.76±0.29	<5.0–136.3 47.8±5.3	<20.0–143.2 26.6±4.6	<5.0–130.3 16.3±2.9	<0.5–3.70 1.39±0.11	<0.0005–0.0018 0.0006±0.0001	<0.005–0.028 0.008±0.001	<0.02–0.919 0.107±0.023
	Год	<0.5–9.7 1.39±0.19	<5.0–408.8 25.3±5.3	<20.0–143.2 29.0±3.8	<5.0–239.9 15.6±3.5	<0.5–10.01 1.49±0.14	<0.0005–0.0048 0.0007±0.0001	<0.005–0.130 0.013±0.002	<0.02–0.919 0.092±0.017
Для района в целом		<0.5–30.70 1,54±0,24	<5.0–654.7 32.0±6.3	<20.0–445.2 31.2±4.7	<20.0–489.4 18.9±3.4	<0.5–10.01 1.38±0.14	<0.0005–0.0048 0.0006±0.0001	<0.005–0.740 0.015±0.004	<0.02–2.299 0.079±0.015
C _V		161	169	126	204	71	108	261	178
A _S		0.53	0.55	0.57	0.43	1.14	0.56	0.32	0.49
E _X		82	32	30	62	20	28	52	84

Примечания. Верхняя строка – пределы концентраций, нижняя – среднее значение с ошибкой среднего (P = 0.95). Коэффициенты: C_V – вариации, A_S – асимметрии, E_X – эксцесса.

Notes. The top line is concentration limits, the bottom line is the average value with an error of the average (P = 0.95). Coefficients: C_V, variations; A_S, asymmetries; E_X, kurtosis.

Таблица 2. Значения фоновых сезонных концентраций веществ двойного генезиса со стандартной ошибкой на прибрежных полигонах юго-западного Сахалина, рассчитанные по квантилям порядка 0.5 ($C_{0.5}$) и 0.75 ($C_{0.75}$) ($P = 0.95$).

Table 2. Background seasonal concentration values of natural or anthropogenic substances with a standard error in testing sites off the southwestern coast of Sakhalin calculated by quantiles of 0.5 ($C_{0.5}$) and 0.75 ($C_{0.75}$), ($P = 0.95$).

Полигон	Сезон	Показатель									
		N-NO ₃ , мкг/дм ³	N-NO ₃ , мкг/дм ³	N-NH ₄ , мкг/дм ³	P-PO ₄ , мкг/дм ³	БПК ₅ , мг/дм ³	Фенолы, мг/дм ³	НП, мг/дм ³	Fe _{общ} , мг/дм ³		
I	$C_{0.5}$	Зима	1.35±0.11	52.8±5.6	45.3±3.7	18.5±1.6	1.11±0.13	<0.0005	0.007±0.001	0.049±0.005	
		Весна	1.14±0.12	26.6±4.6	34.3±2.1	20.1±1.6	1.25±0.11	0.0007±0.0001	0.012±0.003	0.079±0.005	
		Лето	0.58±0.10	<5.0	<20.0	16.6±2.3	1.11±0.12	0.0009±0.0001	0.008±0.001	0.059±0.005	
		Осень	1.33±0.12	42.6±4.0	32.4±2.7	13.8±1.1	1.21±0.10	<0.0005	0.006±0.001	0.050±0.005	
	$C_{0.75}$	Зима	2.15±0.67	83.3±7.2	65.8±3.8	20.6±2.2	2.11±0.20	<0.0005	0.008±0.005	0.069±0.009	
		Весна	1.79±0.19	36.2±9.5	54.1±3.7	29.0±3.1	1.53±0.13	0.0011±0.0001	0.018±0.005	0.127±0.009	
		Лето	0.92±0.22	5.2±4.5	22.2±8.1	22.0±8.8	1.53±0.11	0.0015±0.0001	0.017±0.003	0.098±0.025	
		Осень	2.04±0.15	72.1±4.0	32.4±3.1	20.4±0.9	1.47±0.11	<0.0005	0.012±0.004	0.087±0.020	
	II	$C_{0.5}$	Зима	1.60±0.20	29.3±6.5	35.2±5.2	12.2±1.7	1.19±0.22	<0.0005	0.009±0.002	0.044±0.005
			Весна	1.10±0.22	20.9±2.5	24.2±3.3	7.8±1.4	1.20±0.13	0.0005±0.0001	0.011±0.002	0.048±0.004
			Лето	0.61±0.19	<5.0	<20.0	5.6±4.0	1.77±0.54	0.0007±0.0001	0.006±0.001	0.041±0.006
			Осень	1.34±0.31	49.1±5.9	20.8±3.1	10.0±1.6	0.46±0.09	<0.0005	0.007±0.001	0.039±0.004
$C_{0.75}$		Зима	2.02±0.13	38.9±7.8	48.1±10.2	15.5±1.7	1.88±0.23	0.0006±0.0001	0.015±0.005	0.057±0.007	
		Весна	1.42±0.20	23.8±10.3	27.9±3.9	10.2±1.6	1.60±0.21	0.0009±0.0001	0.017±0.005	0.065±0.015	
		Лето	0.82±0.20	11.8±12.7	<20.0	9.1±2.2	1.86±0.13	0.0011±0.0002	0.007±0.002	0.055±0.005	
		Осень	1.79±0.25	64.4±6.7	20.1±3.0	13.4±6.0	1.78±0.09	<0.0005	0.009±0.003	0.073±0.005	
III		$C_{0.5}$	Зима	1.30±0.14	32.1±4.4	40.3±4.9	12.1±0.94	1.15±0.12	<0.0005	0.007±0.001	0.044±0.004
			Весна	1.12±0.13	20.9±1.6	27.6±2.8	11.2±1.3	1.30±0.08	0.0006±0.0005	0.012±0.002	0.090±0.009
			Лето	0.67±0.02	<5.0	<20.0	10.9±0.19	1.46±0.02	0.0007±0.0004	0.011±0.001	0.063±0.001
			Осень	1.25±0.17	44.2±5.0	20.0±2.5	13.7±1.3	1.39±0.11	0.0006±0.0004	0.008±0.001	0.053±0.014
	$C_{0.75}$	Зима	1.92±0.17	46.4±7.5	52.9±4.8	17.8±3.8	1.68±0.22	0.0006±0.0001	0.008±0.001	0.059±0.010	
		Весна	1.37±0.16	26.4±3.0	47.8±2.9	15.4±3.3	1.80±0.13	0.0009±0.0001	0.017±0.003	0.137±0.018	
		Лето	0.92±0.08	5.8±4.9	25.5±2.6	13.7±0.44	1.79±0.08	0.0010±0.0001	0.015±0.002	0.101±0.007	
		Осень	1.71±0.28	67.4±5.3	25.2±4.5	21.1±2.9	1.77±0.12	0.0008±0.0001	0.009±0.001	0.100±0.015	

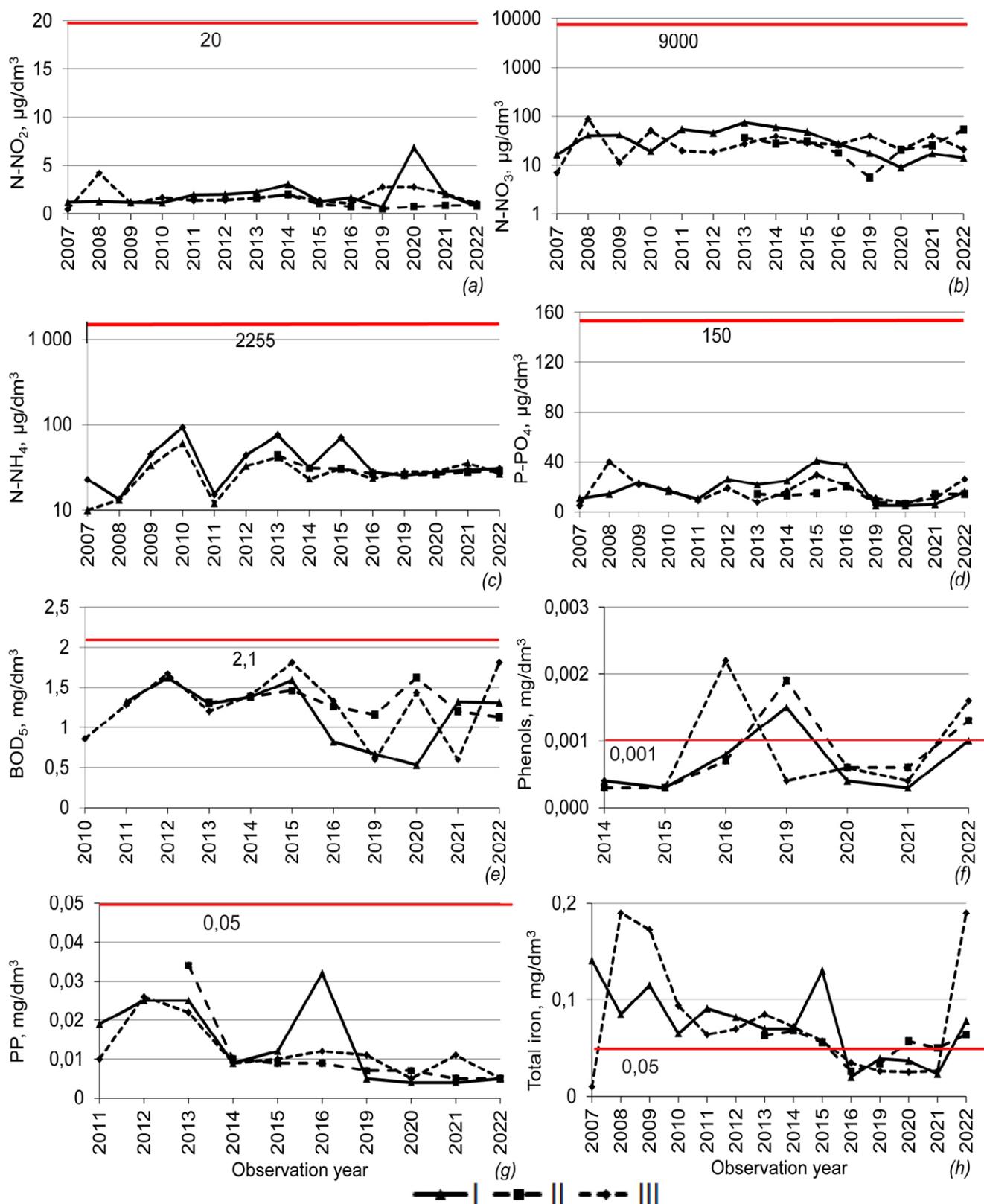


Рис. 2. Среднегодовые значения гидрохимических показателей в воде прибрежных полигонов (см. рис. 1) юго-западного побережья Сахалина относительно нормативов ПДК_{рх} (красная линия на графиках), 2007–2022 гг.

Fig. 2. Average annual values of hydrochemical parameters in the waters of testing sites (see in Fig. 1) off the southwestern coast of Sakhalin relative to the standards and maximum allowable concentrations (red line on the graphs) from 2007 to 2022.

Таблица 3. Средние и фоновые концентрации веществ двойного генезиса в воде прибрежья юго-западного Сахалина по данным 2007–2022 гг.**Table 3.** Average and background concentrations of natural or anthropogenic in the waters off the southwestern coast of Sakhalin according to the data from 2007 to 2022

Показатель	Объем выборки	C_{cp}	$C_{фон 0.5}$	$C_{фон 0.75}$	Нормативы ПДК _{рх}
N-NO ₂ , мкг/дм ³	821	1.7	1.9	2.2	20
N-NO ₃ , мкг/дм ³	821	32.0	64.1	83.3	9000
N-NH ₄ , мкг/дм ³	766	31.2	52.6	65.8	2300
P-PO ₄ , мкг/дм ³	821	18.9	22.6	29.0	150
БПК ₅ , мг/дм ³	501	1.38	1,87	2.11	Не более 2.1
Фенолы, мг/дм ³	274	0.0006	0.0011	0.0015	0.001
НП, мг/дм ³	483	0.015	0.017	0.018	0.05
Fe _{общ} , мг/дм ³	657	0.079	0.108	0.137	0.05

Примечание. Выделены значения показателей, превышающие ПДК_{рх}.*Note.* Indicator values exceeding the maximum permissible concentration for fishery water bodies are highlighted.

а легко окисляемых органических веществ (по БПК₅) – на полигоне III. Пониженные среднесезонные уровни всех гидрохимических показателей характерны для полигона II.

Фоновые сезонные концентрации (табл. 2) свидетельствуют, что доминирующей формой минерального азота в водах прибрежья юго-западного Сахалина является N-NO₃, на его долю приходится до 50 % от суммы всех форм минерального азота. Максимум концентрации нитратов наблюдается осенью и зимой, минимум – летом. Для летнего периода характерны также наиболее низкие в сезонной динамике содержания N-NO₂, N-NH₄ и P-PO₄, некоторый рост их наблюдается осенью и зимой. Повышенное количество Fe_{общ} и НП отмечено весной, фенолов – весной и летом, значение БПК₅ в сезонном аспекте изменяется слабо.

Сравнение среднесезонных статистических характеристик, рассчитанных для всего массива данных (табл. 1), и фоновых сезонных концентраций гидрохимических показателей (табл. 2) с федеральными нормативами показало отклонение от требований к качеству воды объектов рыбохозяйственного значения для одного ингредиента – Fe_{общ}. Его среднесезонные, годовые и фоновые концентрации на отдельных полигонах и в целом по району были выше ПДК_{рх} в 1.04–2.0 раза. Вместе

с тем максимальные концентрации превышали установленные нормативы по большинству показателей: для N-NO₂ – в 1.5 раза; P-PO₄ – в 3.3; БПК₅ и фенолам – в 4.8; НП – в 14.8; Fe_{общ} – в 46 раз. Нарушения требований ПДК_{рх} в отдельные годы отмечены также для среднегодовых содержаний фенолов в 1.5–2.2 раза (рис. 2 f) и Fe_{общ} в 1.4–3.6 раза (рис. 2 h), тогда как для остальных ингредиентов они соответствовали установленным нормативам (рис. 2 a–e, g). Различия между максимальными и минимальными среднегодовыми концентрациями в период мониторинга достигают 10–14 раз для минеральных форм азота и фосфора, а для БПК₅, железа общего, нефтепродуктов и фенолов снижаются до 4–7 раз.

Фоновые концентрации веществ двойного генезиса в воде изученного района у юго-западного Сахалина, рассчитанные по наиболее загрязненному полигону и наиболее неблагоприятному сезону года с использованием двух подходов (табл. 3), для ряда показателей (N-NO₂, N-NO₃, N-NH₄, P-PO₄, НП) лежат значительно ниже рыбохозяйственных нормативов ПДК. Повышенную относительно нормативов ПДК_{рх} природную концентрацию, оцененную по верхнему доверительному интервалу ее среднего значения (при P = 0.95), имеют два показателя – фенолы и Fe_{общ}.

При применении квантиля порядка 0.75 фоновые уровни, превышающие установленные рыбохозяйственные нормативы, имеют три показателя – БПК₅, фенолы и Fe_{общ}.

Обсуждение результатов

Результаты данных экологического мониторинга показали значительную изменчивость гидрохимических показателей в прибрежье у юго-западного Сахалина, что отражают соответствующие им высокие коэффициенты вариации (табл. 1). Неоднородность распределения веществ двойного генезиса, которыми являются изученные ингредиенты, обусловлена взаимодействием большого числа факторов различной природы, в том числе – особенностями взаимодействия поверхностного стока с подстилающей поверхностью на водосборе [4], гидродинамическим режимом акватории и антропогенным прессом [8, 14–16]. Вместе с тем сходство климатических условий, однотипность водосборного бассейна и отсутствие признаков техногенного загрязнения обусловили отсутствие достоверных различий гидрохимических условий на отдельных станциях. Гидрохимический режим изученной акватории в значительной мере определяется естественными природными факторами, о чем свидетельствуют гораздо более низкие содержания нефтепродуктов, а также минеральных форм азота и фосфора, чем ПДК_{рх}. Причиной повышенных концентраций фенолов в воде на отдельных полигонах может быть деятельность живых организмов (морские растения и животные, гетеротрофные бактерии) в береговой зоне [17, 18]. Высокое содержание Fe_{общ} типично для вод прибрежья Сахалина в связи с почвенно-геохимическими условиями водосборной территории [7, 15].

Сезонная динамика среднесезонных концентраций минеральных форм азота и фосфора у юго-западного побережья Сахалина обусловлена продукционно-деструкционными процессами, прибрежным апвеллин-

гом, поступлением соединений биогенных элементов в воды с водосборной территории [7, 8, 19]. Очевидно, что снижение содержания биогенных элементов в прибрежных водах летом (табл. 2) связано с их утилизацией автотрофными водорослями, а рост осенью и зимой – с подъемом богатых биогенными элементами глубинных вод и терригенным стоком. При отсутствии значимых антропогенных источников загрязнения повышенные концентрации фенолов летом в условиях максимального прогрева вод, по-видимому, обусловлены процессами метаболизма растительных организмов [20], обилие которых отмечается на донном грунте и в береговой зоне. Речные воды, наибольшее влияние которых наблюдается весной [21, 22], приносят с водосборной территории повышенные количества НП и Fe_{общ}.

Исходя из того, что функции распределения рядов исходных данных не подчиняются нормальному закону ($p < 0.05$), использование традиционных схем расчета их статистических характеристик, основанных на представлении о нормальности распределений ингредиентов, некорректно и возможно только после исключения экстремальных непоказательных значений. Однако процедура такой отбраковки является сомнительной, поскольку может привести к недоучету концентраций, имеющих другой по сравнению с основным массивом данных генезис и механизм формирования [23]. В качестве определенного компромисса в научной литературе расчет фоновых характеристик гидрохимических показателей, распределение которых отклоняется от нормального, осуществляют по нижней границе квантиля порядка 0.75 ($P = 0.95$) [10–13]. Данный расчет за рубежом используют при установлении целевых показателей качества воды [24, 25], а также в качестве «желательного» показателя [26]. Характеристики гидрохимического фона, полученные по средним значениям и с применением квантиля определенного порядка, принципиально различны: в первом случае наблюдается их увеличение с уменьшением объема выборки,

а во втором – снижение, что методически более обоснованно [10].

Рассчитанные для вод побережья юго-западного Сахалина с использованием двух подходов фоновые концентрации веществ двойного генезиса различаются (табл. 3). Расчет их по нижней границе 0.75 квантиля ($P = 0.95$), когда 75 % значений концентрации ингредиентов лежит ниже ее предельного значения, по нашему мнению, более адекватно отражает гидрохимическую ситуацию, поскольку учитывает больший объем гидрохимической информации, позволяя повысить информативность результатов наблюдений и тем самым обеспечить достоверность контроля состояния вод. Исходя из этого, для установления региональных нормативов изученных веществ в воде прибрежной акватории корректнее использовать квантиль порядка 0.75 ($C_{\text{фон } 0.75}$) (табл. 3) для наиболее загрязненного полигона и наиболее неблагоприятного сезона года. Вместе с тем использование параметрических методов считается оправданным для анализа большого объема рядов гидрохимических показателей в случае, если их выборочные средние значения подчиняются нормальному закону, в то время как распределение исходных переменных отличается от такового [27].

Нормирование изученных веществ может происходить как в сторону увеличения их концентраций по сравнению с ПДК_{рх}, так и в сторону снижения [2, 3, 25, 27 и др.]. Так, для ряда веществ (N-NO₂, N-NO₃, N-NH₄, P-PO₄, НП), фоновые концентрации которых в морских водах юго-западного побережья Сахалина значительно ниже их ПДК_{рх} (табл. 3), требуется снижение регионального норматива. Использование высоких федеральных нормативов ПДК для этих параметров обуславливает получение информации, не отражающей реального состояния водной экосистемы побережья, а значит, создается видимость экологического благополучия и отсутствия рисков негативных последствий (изменения видового состава и трофической структуры, исчезновения отдельных видов водных организмов,

нарушения их биологических циклов и др.). Для ряда показателей (БПК₅, фенолы, Fe_{общ}), фоновые концентрации которых превышают ПДК_{рх}, напротив, требуется установление более высокого регионального норматива, поскольку при использовании федеральных нормативов качество воды акватории оказывается неадекватно отнесенным к не соответствующему установленным требованиям.

Статистически обоснованные характеристики веществ двойного генезиса для морских вод у юго-западного побережья Сахалина (табл. 3), полученные в рамках многолетнего экологического мониторинга, говорят о необходимости разработки региональных нормативов качества с учетом природного гидрохимического фона. Для регионального нормирования могут быть применены фоновые концентрации веществ двойного генезиса, рассчитанные с использованием нижней границы 0.75 квантиля по наиболее загрязненному полигону и наиболее неблагоприятному сезону года (табл. 3, $C_{\text{фон } 0.75}$). В связи с единичными естественными механизмами и факторами формирования гидрохимических условий, обусловленными сходством климатических условий и однотипностью водосборного бассейна, данные ПДК_{рег} предлагается использовать в пределах всего изученного района.

Заключение

Анализ данных экологического мониторинга прибрежных вод юго-западного Сахалина в 2007–2022 гг. позволил выявить значительную пространственно-временную изменчивость ряда гидрохимических показателей – веществ двойного генезиса, связанную с взаимодействием большого числа факторов различной природы, и несоответствие их фоновых (природных) концентраций установленным ПДК_{рх}. Установлено, что федеральные рыбохозяйственные нормативы по одним показателям (N-NO₂, N-NO₃, N-NH₄, P-PO₄, НП) необоснованно завышены относительно фоно-

вых характеристик и не отражают реального состояния водной экосистемы исследуемого региона, а по другим (БПК₅, фенолы, Fe_{общ}) – занижены, поэтому не могут быть соблюдены в силу причин, обусловленных природными гидрохимическим фоном. Таким образом, обоснована необходимость определения региональных нормативов их содержания с учетом реальной гидрохимической обстановки в морской прибрежной акватории.

Установление фоновых концентраций показателей качества вод основывается на анализе функций распределения ряда данных, которые для изученного района не подчиняются нормальному закону. В связи с этим более адекватно отражает гидрохимическую ситуацию, по нашему мнению, расчет фоновых концентраций показателей по нижней границе квантиля порядка 0.75 (P = 0.95), учитывающий особенности их распределений. С использованием данного подхода для морского побережья юго-западного Сахалина предложен перечень веществ двойного генезиса и следующие их содержания для регионального нормирования с учетом фоновых (природных) концентраций: N-NO₂ – 2.2 мкг/дм³; N-NO₃ – 83.3 мкг/дм³; N-NH₄ – 65.8 мкг/дм³; P-PO₄ – 29.0 мкг/дм³; БПК₅ – 2.11 мг/дм³; фенолы – 0.0015 мг/дм³; НП – 0.018 мг/дм³; Fe_{общ} – 0.137 мг/дм³.

Список литературы

- Левич А.П., Булгаков Н.Г., Максимов В.Н. **2004**. *Теоретические и методические основы технологии регионального контроля природной среды по данным экологического мониторинга*. М.: НИА-Природа, 271 с.
- Чеботарев Г.Н., Моисеенко Т.И., Бородач М.В., Гладун Е.Ф., Кремлева Т.А. **2012**. Обоснование региональных нормативов качества вод и правовых механизмов их установления на уровне субъектов Российской Федерации. *Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование*, 12: 227–237. URL: https://vestnik.utmn.ru/upload/uf/c43/vestnik_№12_2012.pdf (дата обращения 23.07.2024).
- Лепихин А.П. **2022**. К совершенствованию технологии регламентации антропогенных нагрузок на водные объекты. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, 4: 100–102. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_49350340_82237527.pdf (дата обращения 04.01.2025).
- Янин Е.П., Кузьмич В.Н., Иваницкий О.М. **2016**. Региональная природная неоднородность химического состава поверхностных вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения. *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*, 6: 3–72. URL: <http://lamb.viniti.ru/sid2/sid2free?sid2=J1449900X> (дата обращения 23.07.2024).
- Кузьмич В.Н., Янин Е.П., Иваницкий О.М. **2020**. О региональных нормативах качества поверхностных пресных вод, устанавливаемых для химических показателей в границах бассейновых округов с учетом геохимических особенностей территорий. В сб.: *Труды IX Международной науч.-практ. конф. «Экологические проблемы. Взгляд в будущее» (Ростов-на-Дону, 22–23 октября 2020 года)*. Ростов-на-Дону: Южный федеральный ун-т, с. 394–398. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_46412598_23368661.pdf (дата обращения 23.07.2024).
- Латковская Е.М., Никулина Т.В., Могильникова Т.А., Коренева Т.Г. **2014**. Материалы к изучению гидрохимических параметров и альгофлоры рек южной части о-ва Сахалин. В кн.: *Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова*, вып. 6: 380–392.
- Могильникова Т.А., Никулина Т.В., Коренева Т.Г., Латковская Е.М., Ведерникова А.А. **2017**. Фитопланктон и химические показатели прибрежных вод юго-западного и южного Сахалина (Татарский пролив и залив Анива). В кн.: *Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова*, вып. 7: 151–167.
- Шевченко Г.В., Марыжихин В.Е., Частиков В.Н. **2023**. Гидролого-гидрохимическая структура вод в зоне апвеллинга у юго-западного побережья о. Сахалин. *Океанологические исследования*, 51(1): 54–70. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.jor-2023.51\(1\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.jor-2023.51(1).3)
- Пищальник В.М., Бобков А.О. **2000**. *Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин*. Ч. 1. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 174 с.
- Возняк А.А., Лепихин А.П. **2018**. Разработка региональных ПДК: необходимость, методика, пример. *Географический вестник*, 2(45): 103–115. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35303043_41847665.pdf (дата обращения 25.07.2024).
- Лепихин А.П., Возняк А.А. **2012**. Статистические функции распределения гидрохимических показателей качества воды поверхностных водных объ-

- ектов. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, 4: 21–32. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_17879597_29471566.pdf (дата обращения 26.07.2024).
12. Лепихин А.П., Мирошниченко С.А., Веницианов Е.В., Губернаторова Т.Н. **2015**. Построение региональных нормативов качества воды (на примере бассейна Верхней Камы). В сб.: *Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.»*. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1: 315–321. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_26905149_93626229.pdf (дата обращения 26.07.2024).
 13. Возняк А.А., Лепихин А.П. **2020**. Разработка методических указаний для региональных ПДК. Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение, 2: 68–71. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26905149_68147561.pdf (дата обращения 27.07.2024).
 14. Коренева Т.Г., Шевченко Г.В., Марьжихин В.Е. и др. **2017**. Результаты исследований условий окружающей среды в районе аварии танкера «Надежда» (прибрежные воды Татарского пролива у юго-западного Сахалина). *Вода: химия и экология*, 11/12: 3–13.
 15. Ведерникова А.А., Коренева Т.Г., Латковская Е.М., Марьжихин В.Е. **2018**. Изучение качества морской среды побережья юго-западного Сахалина по показателям содержания некоторых органических поллютантов. В кн.: *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018*: сб. ст. по материалам междунар. науч.-практ. конф. (24–27 сентября 2018 г.). Севастополь: СевГУ, с. 218–221.
 16. Шевченко Г.В., Частиков В.Н., Марьжихин В.Е. **2018**. Сезонные вариации морских гидрологических характеристик у юго-западного побережья острова Сахалин. *Метеорология и гидрология*, 12: 98–104.
 17. Морозова Т.В., Орлова Т.Ю. **2005**. Мониторинг фитопланктона в районе хозяйства марикультуры в заливе Восток Японского моря. *Биология моря*, 31(1): 11–16.
 18. Локтионова Е.Г., Болонина Г.В., Яковлева Л.В. **2012**. Мониторинг загрязнения фенолами, нефтепродуктами и синтетическими поверхностно-активными веществами внутренних водоемов г. Астрахани. *Вестни ОГУ*, 6(142): 112–116. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_17988769_75971200.pdf (дата обращения 27.07.2024).
 19. Пропп Л.Н., Гаврина Л.Ю. **2019**. Сезонные вариации гидролого-гидрохимических параметров и хлорофилла-а в проливе Лаперуза (Соя) и прилегающих регионах Охотского и Японского моря в 1996–1997 гг. *Труды СахНИРО*, 15: 243–279.
 20. Кондратьева Л.М. **2005**. *Экологический риск загрязнения водных экосистем*. Владивосток: Дальнаука, 299 с.
 21. *Ресурсы поверхностных вод СССР*. **1973**. Т. 18: Дальний Восток. Вып. 22: Сахалин и Курилы. Л.: Гидрометеиздат, 162 с.
 22. *Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши*. **1987**. Т. 1: РСФСР. Вып. 22: Бассейны рек Сахалинской области. Л.: Гидрометеиздат, 228 с.
 23. Беляев С.Д., Прохорова Н.Б. **2019**. Проблемы целеполагания при государственном планировании водоохранных мероприятий в речных бассейнах. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, 4: 12–31. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-4-1>
 24. Беляев С.Д. **2007**. Использование целевых показателей качества воды при планировании водоохраной деятельности. *Водное хозяйство России*, 3: 3–17.
 25. Рисник Д.В., Беляев С.Д., Булгаков Н.Г., Левич А.П., Максимов В.Н., Мамихин С.В., Милько Е.С., Фурсова П.В., Ростовцева Е.Л. **2012**. Подходы к нормированию качества окружающей среды. Законодательные и научные основы существующих систем экологического нормирования. *Успехи современной биологии*, 132(6): 531–550. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_18152660_20579507.pdf (дата обращения 27.07.2024).
 26. *Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs*. **2000**. US Environmental Protection Agency. Washington, DC, EPA-822-B00-001. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-10/documents/nutrient-criteria-manual-lakes-reservoirs.pdf> (accessed 22.09.2024).
 27. Шашуловская Е.А. **2022**. О необходимости региональной регламентации органического вещества и биогенных элементов в нижневолжских водохранилищах. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, 1: 25–38. http://www.doi.org/10.35567/19994508_2022_1_2

References

1. Levich A.P., Bulgakov N.G., Maksimov V.N. **2004**. [Theoretical and methodological basis for the technology of regional environmental control based on environmental monitoring data]. Moscow: NIA-Priroda, 271 p. (In Russ.).
2. Chebotarev G.N., Moiseenko T.I., Borodach M.V., Gladun E.F., Kremleva T.A. **2012**. Rationale for regional normative standards of water quality and their

- regulations in the Regional Laws of the Russian Federation. *Vestnik Tiimenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopol'zovanie*, 12: 227–237. (In Russ.). URL: https://vestnik.utmn.ru/upload/uf/c43/vestnik_№12_2012.pdf (accessed 23.07.2024).
3. Lepikhin A.P. **2022**. On the issue of upgrading the anthropogenic loads regulation technique. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 4: 100–102. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_49350340_82237527.pdf (accessed 04.01.2025).
 4. Yanin E.P., Kuz'mich V.N., Ivanitskiy O.M. **2016**. [Regional natural heterogeneity of the chemical composition of land surface waters and the necessity of taking it into account when assessing their ecological state and the intensity of industrial pollution]. *Problems of environment and natural resources: Review information*, 6: 3–72. (In Russ.). URL: <http://lamb.viniti.ru/sid2/sid2free?sid2=J1449900X> (accessed 23.07.2024).
 5. Kuz'mich V.N., Yanin E.P., Ivanitskiy O.M. **2020**. On regional Quality Standards for surface fresh water established for chemical indicators in the boundaries of basin districts taking into account the geochemical features of territories. In: *Trudy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Environmental problems. Looking to the future"* (Rostov-na-Donu, 22–23 okt. 2020 g.). Rostov-na-Donu: Southern Federal University, p. 394–398. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_46412598_23368661.pdf (accessed 23.07.2024).
 6. Latkovskaya E.M., Nikulina T.V., Mogil'nikova T.A., Koreneva T.G. **2014**. Materials for studying of hydrochemical parameters and algal flora of rivers from southern part of the Sakhalin Island. In: *Chteniya pamyati Vladimira Yakovlevicha Levanidova = Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings*, 6: 380–392. (In Russ.).
 7. Mogil'nikova T.A., Nikulina T.V., Koreneva T.G., et al. **2017**. [Phytoplankton and chemical indices of coastal waters off southwestern and southern Sakhalin (Tatar Strait, Aniva Bay)]. In: *Chteniya pamyati Vladimira Yakovlevicha Levanidova = Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings*, 7: 151–167. (In Russ.).
 8. Shevchenko G.V., Maryzhikhin V.E., Chastikov V.N. **2023**. Hydrological and hydrochemical water structure in the upwelling zone off the southwestern coast of Sakhalin Island. *Journal of Oceanological Research*, 51(1): 54–70. (In Russ.). [https://doi.org/10.29006/1564-2291.jor-2023.51\(1\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.jor-2023.51(1).3)
 9. Pishchal'nik V.M., Bobkov A.O. **2000**. [*Oceanographic atlas of the shelf zone of Sakhalin Island*]. Pt 1. Yuzhno-Sakhalinsk: SakhGU, 174 p. (In Russ.).
 10. Vozniak A.A., Lepikhin A.P. **2018**. [Development of regional MACs: necessity, methodology, example]. *Geograficheskii vestnik = Geographical Bulletin*, 2(45): 103–115. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35303043_41847665.pdf (accessed 25.07.2024).
 11. Lepikhin A.P., Vozniak A.A. **2012**. [Statistical distribution functions of hydrochemical indicators of water quality of surface water bodies]. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 4: 21–32. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_17879597_29471566.pdf (accessed 26.07.2024).
 12. Lepikhin A.P., Miroshnichenko S.A., Venitsianov E.V., Gubernatorova T.N. **2015**. [Development of regional water quality standards (using the example of the Upper Kama basin)]. In: *Nauchnoe obespechenie realizatsii "Vodnoi strategii Rossiiskoi Federatsii na period do 2020 g"*. Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 1: 315–321. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_26905149_93626229.pdf (accessed 26.07.2024).
 13. Voznyak A.A., Lepikhin A.P. **2020**. [Development of guidelines for regional MACs]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*, 2: 68–71. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26905149_68147561.pdf (accessed 27.07.2024).
 14. Koreneva T.G., Shevchenko G.V., Maryzhikhin V.E., et al. **2017**. [Results of the studies of environmental conditions in the area of the Nadezhda tanker accident (coastal waters of the Tatar Strait near southwestern Sakhalin)]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 11-12: 3–13. (In Russ.).
 15. Vedernikova A.A., Koreneva T.G., Latkovskaya E.M., Maryzhikhin V.E. **2018**. [Study of the quality of marine environment of the coastal area of southwestern Sakhalin in terms of the content of some organic pollutants]. In: *Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost' – 2018: sbornik statei po materialam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (24–27 sentyabrya 2018 g.)*. Sevastopol': SevGU, p. 218–221. (In Russ.).
 16. Shevchenko G.V., Chastikov V.N., Maryzhikhin V.E. **2018**. Seasonal variations in marine hydrological characteristics off the southwestern coast of Sakhalin Island. *Russian Meteorology and Hydrology*, 43(12): 865–870. <https://doi.org/10.3103/s1068373918120087>
 17. Morozova T.V., Orlova T.Yu. **2005**. Monitoring of phytoplankton in the area of a sea farm in Vostok Bay (Sea of Japan). *Russian J. of Marine Biology*, 31: 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11179-005-0036-3>

18. Loktionova E.G., Bolonina G.V., Yakovleva L.V. **2012**. [Monitoring of pollution by phenols, oil products and synthetic surfactants of inland water bodies in Astrakhan]. *Vesti OGU*, 6(142): 112–116. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_17988769_75971200.pdf (accessed 27.07.2024).
19. Propp L.N., Gavrina L.Yu. **2019**. Seasonal variations of hydrologic-hydrochemical parameters and chlorophyll a in the La Perouse (Soya) Strait and adjoining areas of Okhotsk and Japan seas in 1996–1997. *Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas: Transactions of the "SakhNIRO"*, 15: 243–279. (In Russ.).
20. Kondrat'eva L.M. **2005**. *Ecological risk of water ecosystems pollution*. Vladivostok: Dal'nauka, 299 p. (In Russ.).
21. *Surface water resources of the USSR*. **1973**. Vol. 18. Far East, Iss. 22. Sakhalin and the Kuril Islands. Leningrad: Gidrometeoizdat, 162 p.
22. [State water cadastre. Long-term data on the regime and resources of land surface waters]. **1987**. Vol. 1. RSFSR, Iss. 22. River basins of the Sakhalin region. Leningrad: Gidrometeoizdat, 228 p.
23. Belyaev S.D., Prokhorova N.B. **2019**. Problems of the goal-setting in public planning of water/protective measures in river basins. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 4: 12–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-4-1>
24. Belyaev S.D. **2007**. [Use of water quality targets when planning water protection activities]. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 3: 3–17. (In Russ.).
25. Risnik D.V., Belyaev S.D., Bulgakov N.G., Levich A.P., Maksimov V.N., Mamikhin S.V., Milko E.S., Fursova P.V., Rostovtseva E.L. **2012**. Approaches to standardizing environmental quality: Legislative and scientific basis of current systems for ecological standardization. *Uspekhi sovremennoi biologii = Biology Bulletin Reviews*, 132(6): 531–550. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_18152660_20579507.pdf (accessed 04.01.2025).
26. *US EPA*. **2000**. *Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs*. US Environmental Protection Agency. Washington, DC, EPA-822-B00-001. First Ed. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-10/documents/nutrient-criteria-manual-lakes-reservoirs.pdf> (accessed 22.09.2024).
27. Shashulovskaya E.A. **2022**. [On the necessity of regional regulation of organic matter and nutrients in the Lower Volga reservoirs]. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 1: 25–38. (In Russ.). http://www.doi.org/10.35567/19994508_2022_1_2

Об авторах

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

Коренева Татьяна Георгиевна (<https://orcid.org/0000-0003-1030-3286>), кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, korenevatg@sakhniro.vniro.ru

Сырбу Ирина Викторовна, ведущий инженер, irus67@inbox.ru

Ведерникова Анна Алексеевна (<https://orcid.org/0009-0003-2205-5141>), главный специалист, vedernikovaaa@sakhniro.vniro.ru

Марыжихин Всеволод Евгеньевич (<https://orcid.org/0000-0002-2775-4991>), заведующий лабораторией, maryzhihinve@sakhniro.vniro.ru

Мазанова Анастасия Дмитриевна, ведущий специалист, tochka6410@bk.ru

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, Russia:

Koreneva, Tatiana G. (<https://orcid.org/0000-0003-1030-3286>), Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, korenevatg@sakhniro.vniro.ru

Syrbu Irina V., Leading Engineer, irus67@inbox.ru

Vedernikova Anna A. (<https://orcid.org/0009-0003-2205-5141>), Chief Specialist, vedernikovaaa@sakhniro.vniro.ru

Maryzhikhin Vsevolod E. (<https://orcid.org/0000-0002-2775-4991>), Head of the Laboratory, maryzhihinve@sakhniro.vniro.ru

Mazanova Anastasia D., Leading Specialist, tochka6410@bk.ru

Поступила 09.10.2024

Принята к публикации 25.11.2024

Received 9 October 2024

Accepted 25 November 2024



2021 United Nations Decade
2030 of Ocean Science
for Sustainable Development

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.107-111>

Дальний Восток России в международной морской научной деятельности и в Десятилетии ООН наук об океане в интересах устойчивого развития

В 2017 г. Генеральная Ассамблея ООН провозгласила Десятилетие наук об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030 гг.) (<https://oceandecade.org/>).

Девиз Десятилетия океана: «Наука, которая нам нужна, для океана, которого мы хотим».

Известно, что не более 1.7 % от исследовательских бюджетов стран мира идет на Океан – гораздо меньше, чем на другие области научных исследований.

План реализации объявленного ООН Десятилетия наук об океане включает набор научных и прикладных целей и задач, достижение и решение которых должно революционизировать наше отношение к океану: обеспечить его здоровье, рациональное использование биологических и минеральных ресурсов, разработать технологии адаптации и смягчения ущерба от опасных океанических явлений и стихийных бедствий. В целом, Десятилетие призывает научное сообщество, образовательные организации, бизнес, политиков, граждан к объединению для реализации самых масштабных действий по изучению и сохранению океана и бережному использованию его ресурсов для человечества. Соответственно, широкий круг партнеров-участников из всех существующих форм науки, власти, бизнеса, образования уже пятый год организует и предлагает Координационному совету Десятилетия различные проекты и мероприятия, а затем выполняет одобренные. Призывы к подаче заявок на программные действия объявляются регулярно каждые полгода. В Призывах указываются требования и условия, которым должны соответствовать заявляемые инициативы. Подача заявок происходит онлайн.

В рамках Межправительственной океанографической комиссии (МОК) ЮНЕСКО и Десятилетия реализуются не только научно-исследовательские инициативы, которые составляют их основу, но и интересные творческие проекты. Например, проект «Тентакулярное мышление»

(<https://crowdusg.net/tentacular-thinking/>) включал создание визуально-тактильной выставки художественных картин с использованием найденных подводных обломков, т.е. на основе подводного монтажа объектов культуры и природы представил реализацию визуально-тактильного опыта по передовой теме научных исследований (т.е. новых моделей биоразнообразия, которые эволюционировали, чтобы жить на микропластике в морской среде).

В первом «Призыве к действию» Десятилетия наук об океане (Call for Decade Actions) претендентам предлагалось подать заявки с описанием инициатив, которые могут внести вклад в реализацию концепции Десятилетия. «Призыв к действию» был объявлен 15 октября 2020 г. и разослан, в том числе, по всем ведомствам и организациям России, которые проводят морские исследования. Дедлайн для подачи заявок первой волны был назначен на 15 января 2021 года. Список поддержанных инициатив публикуется на сайте МОК ЮНЕСКО, создана страница Десятилетия.

На первый призыв научно-исследовательскими и образовательными учреждениями нашей страны было подано 11 проектов, которые были одобрены Исполнительным комитетом Десятилетия и включены в План реализации. Это проекты:

Capacity building Working group for UN Decade of Ocean Sciences, National Oceanographic Commission of Russian Federation (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова);

Development of a warning system for predicting the risk of formation of intense atmospheric vortices of various spatial and temporal scales (water torna-

does, polar mesocyclones) over the seas of the Arctic and middle latitudes (Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды НПО «Тайфун»);

Scientific-educational program OCEAN&Me: school under sail (Музей –заповедник «Музей Мирового океана», Министерство культуры России, г. Калининград);

Comprehensive multidisciplinary research and monitoring of ecosystems of the Arctic Ocean and its seas (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ), Санкт-Петербург);

Complex multidisciplinary research and monitoring of ecosystems in strategic areas of the South Atlantic (ААНИИ, Санкт-Петербург);

The Caspian Sea Digital Twin (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), Москва);

Environmental predictors of the Baltic Sea eutrophication in connection with planning human activity (ИО РАН, Москва);

Creation of an ecological complex for the study, development and nature management of the Azov Sea and Black Sea (Федеральный исследовательский центр «Южный научный центр» РАН, Ростов-на-Дону).

Одна программа – Early Career Ocean Professionals (ECOP) была подана непосредственно Межправительственной океанографической комиссией, а ее координатором была приглашена наша соотечественница Е.А. Костяная (ECOP Programme Global Coordinator and Consultant at IOC-UNESCO) (ИО РАН).

Кроме того, две заявки подало дальневосточное научно-исследовательское учреждение – Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН). Обе они прошли многоэтапный конкурсный экспертный отбор, докладывались на заседаниях Межведомственной национальной океанографической комиссии России и специальной комиссии Десятилетия при МОК ЮНЕСКО и в итоге были одобрены и зафиксированы в специальном документе 13 октября 2021 г. с темами: «Геосистемы и минеральные ресурсы переходных зон «континент–океан» и открытого океана» (ГЕОМИР) (“Geosystems and mineral resources in the transition “continent–ocean” zones

and Open Ocean”) (GEOMIR, ID 164), руководитель д.г.-м.н., доцент Р.Б. Шакиров, и «Морские исследования, управление и образование в северо-западной части Тихого океана и азиатских окраинных морях – транснациональная консолидация» (“A framework for effective trans-national consolidation within marine Research, Education and Management in the northwestern Pacific and Asian Marginal Seas (FREM-PAMS”)), руководитель к.г.н. В.Б. Лобанов.

В период 2021–2024 гг. ТОИ ДВО РАН руководил рабочей группой ВЕСТПАК (подкомиссия МОК по западной части Тихого океана) «Газогидраты и потоки метана в Индо-Тихоокеанском регионе» и продолжает участвовать еще в двух океанографических проектах ВЕСТПАК и Десятилетия.



Логотип проекта ГЕОМИР, ТОИ ДВО РАН

В рамках проекта ГЕОМИР была опубликована монография совместного российско-вьетнамского коллектива, которая признана одним из результатов Десятилетия, что позволило использовать его логотип. В монографии приведены результаты совместных морских и прибрежных научных геолого-геофизических, газогеохимических, микробиологических и других исследований ТОИ ДВО РАН с научными институтами Вьетнамской академии наук и технологий (ВАНТ). Большинство этих результатов были получены благодаря поддержке программы «Дальний Восток», которой руководил Координационный Российско-Вьетнамский центр ДВО РАН. Совместная морская экспедиция в Южно-Китайском море на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2019 г. была поддержана Минобрнауки России. В рамках сотрудничества с Вьетнамской академией наук и технологий в институтах ДВО РАН действуют совместные лаборатории, а в 2024 г. подписан Меморандум о создании совместного центра по морским наукам и технологиям между ТОИ ДВО РАН и ВАНТ. Этот центр стал эволюционным продолжением совместной российско-вьетнамской лаборатории, которая была основана в 2010 г. К настоящему времени

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ И ПРИЛЕГАЮЩЕГО КОНТИНЕНТА

(ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 88 РЕЙСА НИС «АКАДЕМИК М.А. ЛАВРЕНТЬЕВ» И БЕРЕГОВЫХ ЭКСПЕДИЦИЙ 2010-2020)

НИС «Академик М.А. Лаврентьев» — флагман научного флота Дальневосточного отделения РАН, выполнявший более 95 научных экспедиций на акваториях Тихого, Индийского и Северо-Ледовитого океанов. Год постройки: 1984, Финляндия, г. Раума. Порт приписки: г. Владивосток. Находится в оперативном управлении ФГБУ «ИО ВНИИОФ» Минприроды РФ. Длина судна 75,5 м, водоизмещение 2689 т, скорость 14,8 узлов. Автономность — 60 суток. Максимальная численность научного состава — 33 сотрудника.

На судне имеется 8 лабораторий, общей площадью 270 кв. м. За все эти годы судно побывало во многих десятках экспедиций, причем практически каждый раз предметом исследований становились самые актуальные проблемы, связанные с Мировым океаном. Многие успехи в морских исследованиях ДВО РАН были достигнуты именно благодаря экспедициям на НИС «Академик М.А. Лаврентьев».

88 РЕЙСОВ НИС «АКАДЕМИК М.А. ЛАВРЕНТЬЕВ» И БЕРЕГОВЫХ ЭКСПЕДИЦИЙ 2010-2020

Десятилетие Организации Объединенных Наций, посвященное науке об океане в интересах устойчивого развития

2021-2030

GEOMIR IANIGLA

коллективом центра, которым сейчас руководит к.г.-м.н. Н.С. Сырбу (ТОИ ДВО РАН), опубликовано более 50 совместных научных статей.

С 2022 г. на базе Российского технологического университета (РТУ МИРЭА) проводится ежегодная Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Россия в Десятилетии ООН наук об океане». Она объединяет тематические сессии и круглые столы с насыщенной научно-деловой программой и выставочными мероприятиями, представляя уникальную площадку для обмена достижениями, опытом, переговоров и просто встреч коллег «по океану». Ученые дальневосточных НИУ принимают активное участие в организации и мероприятиях конференции.

Благодаря участию в Десятилетии наша страна получает новейшие сведения о передовых инициативах в области Мирового океана, что помогает сверять и национальные векторы в области морских научных и прикладных исследований. В свою очередь на мероприятиях Десятилетия, в том числе в рамках сессий МОК ЮНЕСКО и ее региональных подкомиссий, межведомственные делегации России ежегодно представляют передовые достижения нашей страны и выполняют важную работу по отстаиванию национальных интересов в Мировом океане, расширяют дружественное пространство, предлагают новые идеи и инициативы.

Одними из приоритетных в рамках Десятилетия являются вопросы геокартирования морского и океанического дна, морского пространственного планирования, развития системы постоянных наблюдений в зонах национальных юрисдикций, развития грамотности и потенциала исследований, международный обмен океанографическими данными и информацией. Развиваются глобальная система наблюдения за климатом (ГСНК) и за океаном (ГСНО), системы предупреждения и смягчения последствий опасных океанических явлений и другие направления. Действия по этим направлениям носят глобальный характер. Например, операционный центр OceanOPS в рамках ГСНО координирует более чем 8000 наблюдательных платформ и 13 глобальных сетей наблюдения. Ежедневно обрабатываются более 120 000 наблюдений в реальном времени (синоптических). Данные ассимилируются в численные модели для прогнозов погоды и состояния океана, предупреждения об опасностях и т.д. Действуют не менее 12 международных биологических/экологических систем наблюдений. Информация о биологических исследованиях также приводится на биоэкопортале ГСНО и др.

Общепризнано, что более 80 % площади океанского дна до сих пор не изучено и не нанесено на карту. Этот вопрос в рамках МОК находит-

ся в ведении программы ГЕБКО – Генеральной батиметрической карты океанов (The General Bathymetric Chart of the Oceans, GEBCO), которая издается по решению 7-го Международного географического конгресса 1899 г., многократно переиздана. После 1982 г. обновление выполняется в виде цифровой версии. А в Десятилетии действует программа The Nippon Foundation-GEBCO Seabed 2030 Project (https://forum.oceandecade.org/ventures/85822?p=true&ventures_venture=85822), которая работает фактически с 2017 г. Благодаря этой программе площадь точной батиметрии океанского дна с 2017 по 2021 г. увеличилась с 4 до 20 %.

В рамках МОК и Десятилетия, к сожалению, недостаточно учитываются вопросы геологии (глубинного строения литосферы океана, тектоники, магматизма, геодинамики, стратиграфии, эволюции и др.), что осложняет достижение целей в изучении, освоении и сохранении Мирового океана. В рамках выступлений российской делегации в 2024 г. на МОК (июнь) и конференции ВЕСТПАК (апрель) этот и другие вопросы были обозначены в конструктивном порядке и вызвали интерес у многих участников. В этой связи следует отметить, что активность геолого-геофизического сообщества невелика. Необходимо заявлять и продвигать инициативы, в том числе на международных площадках – например, есть все основания подать соответствующее предложение по проекту Резолюции для очередной сессии МОК ЮНЕСКО.

Десятилетие наук об океане неразрывно связано с деятельностью Межправительственной океанографической комиссии и является по сути ее программным мероприятием в ЮНЕСКО. МОК ЮНЕСКО создана в 1960 г. для содействия передовым исследованиям, способным расширить знания о Мировом океане, и наращиванию потенциала в области океанографии в развивающихся странах, позднее к этому добавилась разработка путей решения глобальных проблем океана и климата, в которой объединяются возможности стран членов МОК в изучении Мирового океана и его ресурсов. На сегодняшний день это 150 государств.

Для взаимодействия с МОК ЮНЕСКО в нашей стране действует Межведомственная национальная океанографическая комиссия (МНОК). Начало деятельности этой комиссии относится

к 1967 г., когда был создан Океанографический комитет Советского Союза для координации участия мореведческих организаций СССР в деятельности МОК ЮНЕСКО. В 1992 г. он переименован в Национальный океанографический комитет Российской Федерации – НОК РФ, а в 2008 г. – в Межведомственную национальную океанографическую комиссию Российской Федерации. На МНОК РФ возлагалась координация участия всех заинтересованных органов власти и других организаций в деятельности МОК ЮНЕСКО по вопросам международного научно-технического сотрудничества в области изучения Мирового океана и его ресурсов.

О том, что в нашей стране особое внимание уделяется морской деятельности, свидетельствуют Указ Президента Российской Федерации о Морской коллегии и Указ, утвердивший Положение об Управлении Президента РФ по вопросам национальной морской политики от 13 августа 2024 г. Морские научные исследования занимают в морской деятельности страны важное место, а их цели определены в соответствующих документах стратегического планирования, основным из которых является Морская доктрина России.

В этой связи можно отметить, что период 2022–2024 гг. был одним из наиболее сложных в работе по взаимодействию с МОК ЮНЕСКО. В 2022–2023 гг. звучали официальные открытые антироссийские заявления, были попытки западных «партнеров» разрушить атмосферу сотрудничества в целях продвижения интересов конкретных групп, нередко в обход Конвенции ООН по морскому праву и с другими нарушениями статуса МОК и ЮНЕСКО. Российская делегация успешно справлялась с такими вызовами, обеспечивая при этом и для других стран соблюдение норм международного права в Мировом океане, и добилась сначала нормализации атмосферы, а затем и того, что с 2024 г. открытых негативных явлений уже не было. Одновременно с напряженной работой по вопросам повестки, российские эксперты официально включались и продолжают работать в ряде важнейших сессионных, межсессионных специальных и рабочих групп и комитетов МОК ЮНЕСКО и смежных структур (Всемирная метеорологическая организация и др.).

Таким образом, активное участие в деятельности МОК ЮНЕСКО и Десятилетия наук об океане в целом отвечает интересам националь-

ной морской политики, определенным в Морской доктрине Российской Федерации и Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 г., способствует решению задач и достижению целевых показателей национальной цели «Технологическое лидерство» в части обеспечения вхождения Российской Федерации в число десяти ведущих стран мира по объему научных исследований и разработок, согласно Указу Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года».

Можно считать, что период 2022–2024 гг. – яркий пример эффективного межведомственного взаимодействия и успешной командной работы российских экспертов. Участие в мероприятиях и программах МОК и других международных площадках необходимо усилить. Экспертная деятельность исключительно важна, но ее необходимо развивать на основе системной поддержки. Необходимо проводить просветительскую работу в ведомствах и учреждениях о роли международной экспертной работы. Нельзя забывать, что за всеми программными мероприятиями ООН, которые официально носят гуманитарный характер, стоит продвижение национальных интересов во всех областях. А Мировой океан в этом плане – передовая арена борьбы этих интересов.

Ближайшим официальным мероприятием МОК и Десятилетия в 2025 г. в рамках обозначенных тем является 15-я сессия ВЕСТПАК, которая пройдет в Токио, Япония, 11–13 марта 2025 г. На сессии будет работать официальная межведомственная делегация Российской Федерации с участием дальневосточных ученых. Основная задача Подкомиссии по западной части Тихого океана Межправительственной океанографической комиссии ЮНЕСКО заключается в развитии и координации международных морских исследований в регионе. Управляющим органом Подкомиссии являются Межправительственные сессии,

которые проводятся с периодичностью раз в два года. В Таиланде учреждено Координационное бюро Десятилетия при Секретариате ВЕСТПАК (резолюция МОК ЕС-55/1 от 14–17 июня 2022 г.).

По инициативе и под руководством ТОИ ДВО РАН в период 2021–2024 гг. успешно действовала официальная рабочая группа ВЕСТПАК «Газогидраты и потоки метана в Индо-Тихоокеанском регионе». По итогам деятельности рабочей группы подготовлен соответствующий проект ВЕСТПАК, который будет заявлен на 15-й сессии в марте 2025 г. и в котором выразили согласие участвовать Вьетнам, Япония, Индонезия, Шри-Ланка, Индия, Китай, Бангладеш, Мадагаскар, Малайзия и др.

А между тем ООН провозгласила старт нового Десятилетия – международного Десятилетия наук в интересах устойчивого развития (2024–2033 гг.), в котором Российская академия наук планирует активно участвовать, откликнувшись на призыв МИД России.



Логотип рабочей группы ВЕСТПАК «Газогидраты и потоки метана в Индо-Тихоокеанском регионе», ТОИ ДВО РАН

*Ренат Белалович Шакиров,
член Межведомственной национальной океанографической комиссии России
Надежда Сергеевна Сырбу,
соруководитель совместного Российско-Вьетнамского центра по морским наукам и технологиям
Антон Сергеевич Макушев,
руководитель отдела внешних связей
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН*

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

E-mail: 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
1.6	Науки о Земле	
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
1.1	Механика	
1.1.8	Механика деформируемого твердого тела	Технические Физико-математические
1.5	Биология	
1.5.15	Экология	Биологические

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

Журнал публикует

- (под тематическими рубриками) оригинальные и обзорные научные статьи, в том числе дискуссионные, краткие научные сообщения, каталоги и базы данных, – *рецензируются*;
- письма в редакцию; информации о полевых и экспериментальных исследованиях, экспедициях, конференциях; рецензии на научные издания – *не рецензируются*.

Публикуемым материалам, кроме чисто информационных, 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

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.

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 каждое замечание и вопрос рецензента;
- 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 (ретракции) 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. После выхода журнала в свет редакция посылает авторам библиографические сведения об опубликованной статье и ссылки на сайты, где размещена электронная версия. Печатные экземпляры издания можно приобрести в редакции или оформив подписку по интернет-каталогу «Пресса России» (индекс 80882).

До или в процессе редподготовки рукописи в редакции журнала автор может разместить свою работу в качестве **препринта** на сайте preprints.ru (<https://preprints.ru/about>) и других. Тем самым он получает возможность ознакомить научное сообщество с результатами своего исследования и получить обратную связь от коллег до публикации в журнале. Препринту присваивается DOI, а после публикации на платформе размещаются сведения об опубликованной статье.

Для сокращения срока публикации автор вправе попросить редакцию об услуге **Online first** – размещении на сайте журнала финальной электронной версии статьи (т.е. прошедшей редподготовку) до того, как работа над выпуском будет завершена. Важнейшим преимуществом такой публикации является возможность полноценного цитирования статьи до выхода в свет выпуска журнала. Статья online first получает собственный уникальный DOI и иные необходимые для библиографической ссылки реквизиты. После того как номер журнала будет окончательно сформирован и подписан в печать, метаданные и DOI статьи останутся неизменными.

Структура основного файла (при отправке в редакцию файл именуется по первому автору: Иванов.docx)

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 автора для контактов и указать e-mail для переписки).

Полные названия учреждений (как они значатся в Уставе), с которыми 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 или тем госзаданий 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, полное и сокращенное (аббревиатура) название учреждения (как в Уставе), ORCID (Open Researcher and Contributor ID), e-mail. Все эти сведения обязательны.

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,
- список литературы (References);
- полные сведения о всех авторах.

Транслитерация элементов (при необходимости) производится в системе BGN – с помощью сайта <https://transliteration.pro/bgn-pcgn>

Схему оформления статьи и рекомендуемый перевод званий и должностей см. на сайте журнала в файле «Образец оформления статьи».

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).

Для лучшего восприятия и цитирования статьи желательно придерживаться четкой структуры, учитывая рекомендации АНПИ (Ассоциации научных редакторов и издателей), а также рекомендации EASE (European Association of Science Editors) для авторов и переводчиков научных статей на английский язык.

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).

Материал (объект) и методы исследования

- Опишите методы и методики, которые вы применяли при изучении поставленной проблемы.
- Не описывайте процедуры и методы, опубликованные ранее, дайте на них ссылки.
- 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 подрисовочные 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.
- 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.

Список литературы

Обязательны работы последних 5–10 лет.

Желательно отдавать предпочтение ссылкам на публикации в журналах и минимизировать ссылки на монографии региональных издательств и малодоступные издания.

Цитирование собственных работ не должно превышать 15 % от общего числа в списке.

Данные

Если фактологическая база статьи обширна и имеет самостоятельную научную ценность, фактические данные можно оформить в виде статьи типа **Данные исследования** (Data Paper). Такая публикация содержит ссылку на собственно научную статью (или несколько статей), в которой обсуждаются результаты обработки этих данных, и обычно состоит из описания методов, таблиц, рисунков и т.п. Ей присваивается собственный DOI. Авторы могут указывать ее в списке научных трудов, отчитываться ею перед Минобрнауки. Подобная информация также может быть размещена в виде приложения к статье в электронной версии журнала.

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	вверху и внизу – 1 см, слева и справа – 1.5 см
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), включая название статьи, заголовки и подзаголовки, кроме случаев, подчиняющихся общепринятым орфографическим правилам, набираются *строчными* (не прописными!) буквами. В русскоязычном тексте используются «кавычки», но не "кавычки", в англоязычном – “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 вставные символы и индексы в рефератах на русском и английском языках – в интернет-сети они не всегда отображаются.

Латинские символы набираются в тексте курсивом, греческие прямым.

Таблицы должны быть озаглавлены, в них не должно быть пустых ячеек. Прочерк обязательно поясняется 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 их уменьшения до размеров полосы и колонки. *Ширина рисунка* после 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 до 0.4 мм.

Рисунки оформляются *без рамок*.

Размер букв в основных надписях на рисунках после их уменьшения должен соответствовать 10 кеглю шрифта Arial (основной), во второстепенных, подчиненных надписях – 9 и 8 кеглю. Литеры для обозначения частей рисунка выполняют латиницей 10 кеглем шрифта Arial (курсив). Литеры 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 русскоязычного 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; исключения составляют географические карты), т.е. надписи даются или на всех рисунках на русском, или на всех на английском.

В *подрисуточных подписях* желателен 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: (a), (b) 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 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: [2, 4–6]. Наряду со списком на русском языке приводится список источников на английском.

Списки литературы с учетом требований международных систем цитирования должны быть приспособлены для автоматической обработки с целью идентификации ссылок. Поэтому библиографические сведения необходимо приводить в точном соответствии с тем, как они даны в оригинальной публикации.

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, методические материалы;
- статьи из ненаучных журналов;
- нормативные и законодательные акты;
- статистические сборники и архивы;
- электронные неопубликованные ресурсы (газетные и любые новостные ресурсы, доклады и разные исследования на сайтах, сайты учреждений и организаций);
- словари, энциклопедии, другие справочники;
- отчеты, записки, рапорты, протоколы.

Такие источники оформляются в виде внутритекстовых ссылок в круглых скобках или в виде постраничных сносок внизу страницы (их описания составляются по общим правилам).

Для **References** автор должен привести описания английских версий публикаций, если они есть, или переведенные на английский язык библиографические сведения о работе, опубликованной на русском или ином языке (*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). При этом переводы необходимо брать из оригинальных источников (в журналах, как правило, помещают метаданные статей на английском языке). **Если же авторы переводят на английский язык названия статей, монографий, сборников статей и т.п. самостоятельно или с помощью переводчика, редакция просит такой перевод обязательно заключать в квадратные скобки.**

Официальный перевод источников, индексируемых РИНЦ, можно получить из базы Научной электронной библиотеки (<https://elibrary.ru>).

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.

Обязательные элементы:

авторы (редакторы),

год издания (полужирным),

полное наименование книги или статьи,

место издания, издательство (для книги),

название источника в полной форме,

том, номер (в скобках), количественная характеристика (для книги – общее число страниц, для статьи или главы – страницы, на которых она помещена, например: 5–10),

идентификаторы DOI в формате <https://doi.org/> и EDN: (если имеются) и/или унифицированный идентификатор ресурса URI (URL) и дата обращения.

Авторы числом до 10 приводятся все.

Названия журналов необходимо приводить полностью, без сокращений

Курсивом выделяется при описании моноиздания название работы, а в аналитическом описании – название источника.

Примеры библиографических описаний в списке литературы

Монографическое издание

1. Кочарян Г.Г. **2016.** *Геомеханика разломов*. М.: ГЕОС, 424 с. EDN: YVWLRV

Kocharyan G.G. **2016.** *Geomechanics of faults*. Moscow: GEOS, 424 p. (In Russ.). EDN: YVWLRV

2. Соболев Г.А. **1993.** *Основы прогноза землетрясений*. М.: Наука, 310 с. EDN: TGSIGH

Sobolev G.A. **1993.** [*Fundamentals of the earthquake prediction*]. Moscow: Nauka, 313 p. (In Russ.). EDN: TGSIGH

Название работы переведено автором, поэтому заключено в квадратные скобки.

В коллективных монографиях (авторов более 4), как правило, вместо авторов указывается редактор. В зарубежных изданиях коллективные работы обычно описывают под именами редакторов с пометой (Ed.). В российских журналах редактор стоит либо в позиции автора с пометой (ред.), либо после заглавия.

3. Поплавская Л.Н. (ред.) **2006.** *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.* Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с. ИЛИ:

Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг. **2006.** Авт: Поплавская Л.Н. (ред.), 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.

Poplavskaya L.N. (Ed.) **2006.** [*Regional catalogue of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005*]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN [IMGIG FEB RAS], 103 p. (In Russ.).

4. 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).

5. 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>

Монография опубликована в серии в виде отдельного выпуска. Название серии и номер выпуска приводятся в круглых скобках.

Статья в периодическом издании

6. Pletchov P.Y., Gerya T.V. **1998.** Effect of H₂O on plagioclase-melt equilibrium. *Experiment in Geosciences*, 7(2): 7–9. URL: http://library.iem.ac.ru/exper/v7_2/khitar.html#pletchov (accessed 14.11.2019).

7. Chen R., Shen J., Li C., Zhang E., Sun W., Ji M. **2015.** Mid- to late-Holocene East Asian summer monsoon variability recorded in lacustrine sediments from Jingpo Lake, Northeastern China. *Holocene*, 25: 454–468. (Online first 2014).

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>

Статья, опубликованная в русской и английской версиях журнала

9. 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>

10. Никитенко О.А., Ершов В.В., Левин Б.В. **2017**. Первый опыт выделения гидрогеохимических индикаторов грязевулканической активности. *Доклады Академии наук*, 477(5): 586–589. <https://doi.org/10.7868/S0869565217350171>

Nikitenko O.A., Ershov V.V., Levin B.W. **2017**. The first identification of hydrogeochemical indicators of mud volcanic activity. *Doklady Earth Sciences*, 477: 1445–1448. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17120170>

Англоязычные метадаанные статьи и название журнала приведены в источнике

11. 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>; EDN: YQXRET

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>; EDN: YQXRET

12. Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Будков А.М., Иванченко Г.Н. **2019**. О генезисе Бачатского землетрясения 2013 года. *Геодинамика и тектонофизика*, 10(3): 741–759. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439>; EDN: CHOELE

Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Budkov A.M., Ivanchenko G.N. **2019**. On the genesis of the 2013 Bachat earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics*, 10(3): 741–759. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439>; EDN: CHOELE

13. Гирина О.А., Малик Н.А., Котенко Л.В. **2008**. Активность вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Северные Курилы) в 2002–2007 гг. по данным KVERT. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(11): 67–73. EDN: IUKFGF

Girina O.A., Malik N.A., Kotenko L.V. **2008**. 2002–2007 activity of Chikurachki volcan (Paramushir Island, Northern Kuriles) based on KVERT data. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(11): 67–73. (In Russ.). EDN: IUKFGF

В журнале (и на сайте журнала) нет перевода названия журнала на английский язык:

14. Гаврилов А.В., Романовский Н.Н., Хуббертен Х.-В. **2006**. Палеогеографический сценарий послеледниковой трансгрессии на шельфе моря Лаптевых. *Криосфера Земли*, 10(1): 39–50. EDN: HTVSSB

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.). EDN: HTVSSB

Статья в сборнике статей или материалов конференции, глава в монографии

Перед источником ставим В кн.: = In:

15. Grebennikova T.A. **2011**. Diatom flora of lakes, ponds and streams of Kuril Islands. In: *Diatoms: Ecology and Life Cycle*. New York: Nova Publ., p. 93–124.

16. Yin X.C., Chen X.Z., Song Z.-P., Yin C. **1995**. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. In: *Mechanics problems in geodynamics*, pt 1: 701–715. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-9065-6_17

17. 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, p. 457–477.

18. Torunbalchi N. **2004**. Seismic isolation and energy dissipating systems in earthquake resistant design. In: *13th World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6*. Paper no. 3273. URL: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_3273.pdf (accessed 12.11.2010).

Патент

19. 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 RU 141416. *Signalizator izmeneniy glavnykh komponent = [Main component change detector]*. **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.).

20. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023688937. «Ice Data Processing». 2023. Авт.: Шумилов И.В., Романюк В.А., Пищальник В.М. № 2023682641 от 30.10.2023; опубл. 25.12.2023.

[Certificate of registration of the computer program] No. 2023688937. "Ice Data Processing". 2023. Authors: Shumilov I.V., Romanyuk V.A., Pishchalnik V.M. No. 2023682641 from 30.10.2023; publ. 25.12.2023. (In Russ.).

Автореферат диссертации и диссертация (ссылки на подобные источники желательно минимизировать)

21. Григорьев Ю.А. **1995**. *Разработка научных основ проектирования архитектуры распределенных систем обработки данных*: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва.

Grigoriev Yu.A. **1995**. [Development of scientific basis for designing the architecture of distributed data processing systems]: extended abstr. of diss. ... Dr of Engineering. Bauman MSTU, Moscow. (In Russ.).

22. Semenov V.I. **2003**. [*Mathematical modeling of the plasma in the compact torus*]: extended abstr. of diss. ... Cand. Sci. (Phys. and Math.). MFTI = MIPT, Moscow.
23. Bowkett D. **2015**. *Investigating the ligandability of plant homeodomains*: PhD thesis. Oxford University.
24. Булгаков Р.Ф. **1994**. *История развития южных островов Большой Курильской гряды в плейстоцене*: дис. ... канд. геогр. наук. Московский гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, Москва.
- Bulgakov R.F. **1994**. [*History of development of southern islands of the Great Kuril Ridge in the Pleistocene*]: thesis ... Cand. of Sci. (Geography). Moscow State University, Moscow. (In Russ.).

Интернет-ресурс

25. Кондратьев В.Б. **2011**. *Глобальная фармацевтическая промышленность*. URL: <http://perspektivy.info/rus/ekob/2011-07-18.html> (дата обращения 23.06.2013).
- Kondratyev V.B. **2011**. *The global pharmaceutical industry*. (In Russ.). URL: <http://perspektivy.info/rus/ekob/2011-07-18.html> (accessed 23.06.2013).
26. Шифман Е.М. (ред.) **2005**. *Техника спинальной анестезии* [Электронный ресурс]. М.: ИнтелТек, 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
- Shifman E.M. (Ed.) **2005**. *Tekhnika spinal'noy anestezii* [Electronic source]. Moscow: IntelTek. 1 electronic optical disk (CD-ROM). (In Russ.).
27. NGDC: *Tsunami data and information*. URL: https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml (accessed 29.09.2019).

ГОСТы, инструкции и т.п.

28. ГОСТ Р 9.905-2007 (ИСО 7384:2001, ИСО 11845:1995) ЕСЗКС. *Методы коррозионных испытаний. Общие требования*. Введ. 2009-01-01.

Составитель
Галина Филипповна Низяева