

Научный журнал

Учредитель и издатель:

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Издаётся с января 2017 г.

Периодичность издания 4 раза в год

Scientific journal

Founder and Publisher:

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

Published since January 2017

Periodicity: Quarterly

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

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

Журнал:

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

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

The Journal is:

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

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

Адрес учредителя и издателя

ИМГиГ ДВО РАН
ул. Науки, 16, Южно-Сахалинск, 693022
Тел./факс: (4242) 791517
E-mail: gtrz-journal@mail.ru
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 автоматики 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 автоматики 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
- **Разжигаяева Надежда Глебовна**, д-р геогр. наук, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток
- **Ребetsкий Юрий Леонидович**, д-р физ.-мат. наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва
- **Родкин Михаил Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва
- **Рыбин Анатолий Кузьмич**, д-р физ.-мат. наук, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия

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 университет генетики, биотехнологии и инженерии 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 University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov
- **Hiroaki Takahashi**, Professor, Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, Sapporo, Japan
- **Yuliya I. Troitskaya**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhniy Novgorod; Lobachevsky University, Nizhniy Novgorod
- **Renat B. Shakirov**, Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Associate Professor, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- **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 8072. Свободная цена.
 Дата выхода в свет 26.09.2025.

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. (Phylogeny)
Desktop publishing **Anna A. Filimonkina**
Design **Alexandra V. Leonenkova**

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

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 13.9.
 Number of copies 150. Order no. 8072. Free price.
 Date of publishing 26.09.2025.

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. Геотектоника и геодинамика

Н.Ф. Василенко, А.С. Прытков, Д.И. Фролов, А.С. Тен. Современные движения и деформации центральной части острова Сахалин 225

Геофизика, сейсмология

В.Н. Сычев, Л.М. Богомолов. Динамические параметры очагов землетрясений на острове Сахалин в 1978–2024 гг. 238

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

А.С. Закупин. Прогноз землетрясений методом LURR на Сахалине в режиме реального времени. Результаты мониторинга в 2023–2025 гг. и их оценка в связи с мегаземлетрясением на Камчатке 30.07.2025, *M* 8.8 256

Геофизика, сейсмология

Геоинформатика и картография

П.Н. Александров, Л.В. Стасенко. Определение моментов времени вступления сейсмических сигналов на основе анализа их фазовых характеристик 265

Океанология

Ю.П. Королёв. Волны в слое жидкости, возбуждаемые вариациями давления над свободной поверхностью 277

Экология. Геоинформатика и картография

А.В. Косарев, И.В. Сергеева, А.В. Ключиков, С.В. Чумакова, А.А. Леонтьев. Характеристика древесной растительности лесного биогеоценоза с применением искусственного интеллекта на основе данных дистанционного зондирования . . 286

Экология. Гидробиология

О.Н. Мухаметова, И.Н. Мухаметов. Условия нереста японского анчоуса *Engraulis japonicus* (Engraulidae) в юго-восточной части Сахалинского залива (Охотское море) 299

Геология, поиск, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

Р.Ф. Булгаков, Л.М. Богомолов. Методический эксперимент по применению цеолитизированных туфов для обнаружения низких концентраций углеводородов в среде, моделирующей придонные осадки 325

Хроника научной жизни

ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЕ УЧЕНЫЕ

И.П. Кремнева, О.В. Веселов, А.В. Дегтерев, М.В. Чибисова. Вулканологические исследования на Сахалине и Курильских островах под руководством В.Н. Шилова в 1958–1971 годах (из истории ИМГиГ ДВО РАН) 332

Geophysics. Geotectonics and geodynamics

N.F. Vasilenko, A.S. Prytkov, D.I. Frolov, A.S. Ten. Recent movements and deformations in Central Sakhalin 225

Geophysics, Seismology

V.N. Sychev, L.M. Bogomolov. Dynamic parameters of earthquake sources that occurred on Sakhalin Island in 1978–2024. 238

SHORT REPORT

A.S. Zakupin. Real-time LURR earthquake forecast in Sakhalin. Results of the monitoring in 2023–2025 and their assessment in connection with the megathrust earthquake in Kamchatka on July 30, 2025, *M* 8.8. 256

Geophysics, Seismology
Geoinformatics and cartography

P.N. Aleksandrov, L.V. Stasenکو. Determination of the timing of the entry of seismic signals based on the analysis of their phase characteristics. 265

Oceanology

Yu. P. Korolev. Waves in a fluid layer excited by pressure variations above the free surface. 277

Ecology. Geoinformatics and cartography

A.V. Kosarev, I.V. Sergeeva, A.V. Klyuchikov, S.V. Chumakova, A.A. Leontiev. Characterization of the woody vegetation of the forest biogeocenosis using artificial intelligence based on remote sensing data 286

Ecology. Hydrobiology

O.N. Moukhametova, I.N. Moukhametov. Spawning conditions of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* (Engraulidae) in the south-eastern part of Sakhalin Gulf (the Sea of Okhotsk) 299

Geology, exploration and exploitation
of oil and gas deposits

SHORT REPORT

R.F. Bulgakov, L.M. Bogomolov. Methodical experiment on the use of zeolitized tuffs to detect low concentrations of hydrocarbons in an environment simulating bottom sediments 325

Current scientific events

FAR EASTERN SCIENTISTS

I.P. Kremneva, O.V. Veselov, A.V. Degterev, M.V. Chibisova. The volcanological studies in Sakhalin and the Kuril Islands under the leadership of Vsevolod N. Shilov in 1958–1971 (from the history of IMGG FEB RAS) 332

© 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 551.242.1:528.344

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.0.rma-361>

<https://www.elibrary.ru/zlcdn>

Опубликована online 30.07.2025

Современные движения и деформации центральной части острова Сахалин

Н. Ф. Василенко¹, А. С. Прытков^{1@}, Д. И. Фролов², А. С. Тен³

@E-mail: a.prytkov@imgg.ru

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

² Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Резюме. На основе межсейсмических скоростей GNSS-пунктов детализированы горизонтальные деформации центральной части о. Сахалин. В районе исследований преобладают условия одноосного сжатия, однако пространственное распределение деформаций в окрестностях трансрегиональных литосферных разломов (Центрально-Сахалинского и Хоккайдо-Сахалинского) неоднородно. Максимальное сокращение земной поверхности СЗ-ЮВ направления происходит в зоне Хоккайдо-Сахалинского разлома. К зоне Центрально-Сахалинского разлома и его ближайшим окрестностям приурочена область интенсивных деформаций правостороннего сдвига и минимальных скоростей дилатации. Кинематика района в целом свидетельствует о сжатии островной суши со скоростью 2 мм/год и правостороннем сдвиге 2.5 мм/год, что соответствует современному тектоническому режиму региона. Правосторонний сдвиг в зоне Центрально-Сахалинского разлома (1 мм/год) подтверждает его кинематику по данным геолого-геоморфологических исследований. Признаки правостороннего сдвига в зоне Хоккайдо-Сахалинского разлома (~0.4 мм/год) проявляются только в пределах ошибок его определения. По данным GNSS-наблюдений получена первая оценка вековых вертикальных движений в районе исследований. Абсолютные вертикальные движения центральной части острова имеют унаследованный характер по отношению к новейшим структурам. Воздымания со скоростью ~3 мм/год проявляются в пределах Западно-Сахалинского и Восточно-Сахалинского поднятий. Небольшое опускание земной поверхности происходит в Тымь-Поронайском прогибе.

Ключевые слова: современная геодинамика, GNSS-наблюдения, деформации, остров Сахалин

Recent movements and deformations in Central Sakhalin

Nikolay F. Vasilenko¹, Alexander S. Prytkov^{1@}, Dmitry I. Frolov², Alexander S. Ten³

@E-mail: a.prytkov@imgg.ru

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

² Ioffe Physical-Technical Institute, RAS, Saint Petersburg, Russia

³ Computing Center, FEB RAS, Khabarovsk, Russia

Abstract. Based on the interseismic velocities of GNSS points, the horizontal deformations in Central Sakhalin were studied. The research area is characterized by the predominance of uniaxial compression conditions, however, the spatial distribution of deformations in the vicinity of the trans-regional lithospheric faults (Central-Sakhalin and Hokkaido-Sakhalin) is heterogeneous. The maximum reduction of the earth's surface in the NW-SE direction occurs in the Hokkaido-Sakhalin fault zone. The area of intensive deformations of right-lateral slip and minimal dilatation rates is confined to the Central Sakhalin fault zone and its nearest surroundings. Overall, the kinematics of the region indicate the compression of the island at the rate of 2 mm/year and the right-lateral slip of 2.5 mm/year, which corresponds to the recent tectonic regime of the region. The right-lateral slip in the Central Sakhalin fault zone (1 mm/year) confirms its kinematics according to geological and geomorphological studies. Signs of a right-lateral slip in the Hokkaido-Sakhalin fault zone (~0.4 mm/year) appear only within the limits of their determination errors. Based on GNSS obser-

vations, the first estimates of secular vertical movements in the investigation area were obtained. The absolute vertical movements in Central Sakhalin are inherited in relation to neotectonic structures. West-Sakhalin and East-Sakhalin uplifts elevate at the rate of ~3 mm/year. A slight sinking of the earth's surface occurs in Tym-Poronaysk depression.

Keywords: recent geodynamics, GNSS observations, deformations, Sakhalin Island

Для цитирования: Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И., Тен А.С. Современные движения и деформации центральной части острова Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 3, с. 225–237. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.rma361>; <https://www.elibrary.ru/zlcdns>

For citation: Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I., Ten A.S. Recent movements and deformations in Central Sakhalin. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 3, pp. 225–237. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.rma361>

Введение

Остров Сахалин входит в число наиболее тектонически активных регионов России. Его геодинамика в свете современных представлений определяется конвергенцией Евразийской и Североамериканской (Охотской) литосферных плит. При всей неоднородности точек зрения на положение межплитовой границы большинство исследователей связывают ее с системой трансрегиональных субмеридиональных разломов острова: Хоккайдо-Сахалинского, Центрально-Сахалинского и Западно-Сахалинского [1–4] (рис. 1). Схождение литосферных плит проявляется в интенсивном неоднородном деформировании земной коры и высокой сейсмической активности региона [5].

В начале 2000-х годов на севере, в центральной части и юге острова были созданы региональные сети спутниковых GNSS (Global Navigation Satellite System) геодинамических наблюдений, представляющие собой поперечные профили, пересекающие островную сушу с запада на восток. По данным многолетних GNSS-наблюдений установлена скорость схождения и глубина механического сцепления литосферных плит, а также исследовано распределение горизонтальных деформаций в пределах островной суши [4, 6].

Первые инструментальные сведения о скоростях вертикальных движений неотектонических структур острова были обобщены в Карте современных вертикальных движений земной коры о. Сахалин (далее – карта СВДЗК), составленной в конце 70-х годов прошлого столетия [7, 8]. В центральном сегменте острова

карта охватывала только его западную часть. В геодезическую основу карты были положены линии повторного высокоточного нивелирования. Для получения абсолютных скоростей вертикальных движений в качестве исходных использовались данные постов наблюдений за уровнем морей. Поправка в мареографические данные за эвстатический подъем уровня Мирового океана не вводилась, что является основным недостатком карты и приводит к некорректным величинам абсолютных (вековых) скоростей и их интерпретации. Этот недочет нельзя отнести к упущению авторов карты: скорость эвстатического подъема уровня Мирового океана ко времени составления карты была предметом обширных дискуссий и оценена с достаточной точностью только к началу XXI в. [9].

Геодинамическая сеть в центре острова, в отличие от севера и юга, на начальном этапе исследований не имела должного сгущения и не позволяла в полной мере оценить горизонтальные и вертикальные смещения отдельных структурных элементов. В 2011 г. поперечный профиль в этой части острова был дополнен новыми промежуточными пунктами наблюдений (рис. 1 б). Данные повторных измерений GNSS-сети в 2023 г. позволили детализировать региональные геодинамические исследования.

Целью настоящей работы является уточнение картины современных горизонтальных деформаций земной поверхности и оценка вековых вертикальных движений неотектонических структур центральной части о. Сахалин на основе межсейсмических скоростей пунктов геодинамической GNSS-сети.

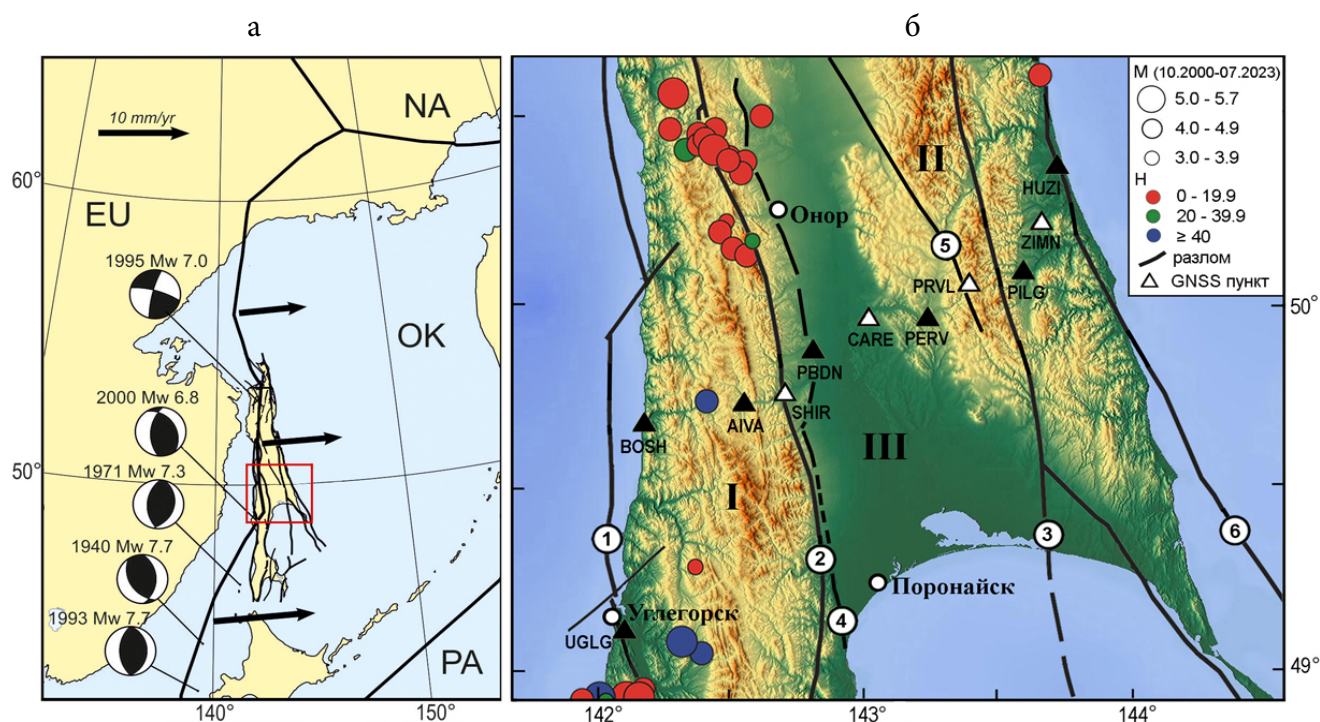


Рис. 1. (а) Границы литосферных плит региона: EU – Евразийская, NA – Североамериканская, PA – Тихоокеанская, ОК – Охотская. Стрелками показаны скорости схождения литосферных плит относительно Северной Америки [10]. Механизмы очагов сильнейших землетрясений приведены по данным The United States Geological Survey (<https://earthquake.usgs.gov>). Прямоугольником выделен район исследований. (б) Схема расположения GNSS-пунктов геодинимической сети центральной части о. Сахалин и эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$ за период октябрь 2000 – июль 2023 гг. Черными треугольниками обозначены пункты, наблюдения на которых начаты в 2000 г., белыми – в 2011 г. I – Западно-Сахалинское поднятие, II – Восточно-Сахалинское поднятие, III – Тым-Поронайский прогиб. Трансрегиональные литосферные разломы: 1 – Западно-Сахалинский, 2 – Центрально-Сахалинский, 3 – Хоккайдо-Сахалинский; коровые разломы: 4 – Апреловский, 5 – Первомайский, 6 – Пограничный. Разломы показаны по данным [11] с упрощением.

Fig. 1. (a) The boundaries of the lithospheric plates: EU, Eurasian; NA, North American; PA, Pacific; OK, Okhotsk. The arrows show the rates of convergence of the lithospheric plates in relation to North American [10]. The focal mechanisms of the strongest earthquakes are given according to The United States Geological Survey (<https://earthquake.usgs.gov>). The research area is marked by rectangle. (b) The layout scheme of GNSS points of the Central Sakhalin geodynamical network and earthquake epicenters with $M \geq 3.0$ for the period from October 2000 to July 2023. Black triangles indicate the points where observations began in 2000; white ones, in 2011. I, West-Sakhalin uplift; II, East-Sakhalin uplift; III, Tym-Poronaysk depression. The trans-regional lithospheric faults: 1, West-Sakhalin; 2, Central-Sakhalin; 3, Hokkaido-Sakhalin; and crustal faults: 4, Aprelovsky; 5, Pervomaisky; 6, Pogranichny. The faults are given according to [11] (simplified).

Характеристика района исследований

В тектоническом отношении о. Сахалин представляет собой кайнозойскую складчато-блоковую систему [12, 13]. Центральный сегмент острова в региональном структурно-неотектоническом плане состоит из двух поднятий: молодого, плиоцен-четвертичного Западно-Сахалинского и более древнего, мел-палеогенового Восточно-Сахалинского, видоизмененно-возрожденного в плиоцен-четвертичное время, – разделенных Тым-Поронайским прогибом (рис. 1 б). Западно-Сахалинское поднятие представляет собой

единое, субмеридионально вытянутое вдоль острова горное сооружение, состоящее из субпараллельно вытянутых хребтов, тогда как Восточно-Сахалинское поднятие состоит из отдельных, резко разобщенных хребтов, образующих сложную горную систему.

Крупнейшие дизъюнктивы центральной части острова многими исследователями отнесены к разломам разного ранга – трансрегиональным литосферным разломам (Западно-Сахалинский, Центрально-Сахалинский, Хоккайдо-Сахалинский) и региональным коровым разломам [3, 11, 13–15]. Кинематику Западно-Сахалинского и Центрально-Сахалинского разломов большинство исследователей

характеризует как взбросо-надвиговую, с явными признаками правосторонних сдвигов. Представления о направлении смещения в центральном сегменте Хоккайдо-Сахалинского разлома весьма разноречивы.

Сейсмичность района исследований за весь период инструментальных сейсмологических наблюдений характеризуется неоднородным распределением эпицентров землетрясений, гипоцентры которых сосредоточены в основном в земной коре на глубинах до 20 км [5]. Высокой сейсмической активностью выделяется территория Западно-Сахалинского поднятия, тогда как районы Тымь-Поронайского прогиба и большей части Восточно-Сахалинского поднятия практически асейсмичны. Небольшой участок редких и относительно слабых землетрясений $M \leq 4.9$ отмечается только в восточной части Восточно-Сахалинского поднятия на широте $\sim 50.7^\circ \text{N}$ между Хоккайдо-Сахалинским и Пограничным разломами.

Повышенная сейсмичность Западно-Сахалинского поднятия тесно связана с тектонической активностью ограничивающих его трансрегиональных разломов – Западно-Сахалинского и Центрально-Сахалинского. Области сгущения умеренных и сильных землетрясений, приуроченные к зонам этих разломов и их оперений, разделены участками с редкими эпицентрами слабых толчков. В зоне Западно-Сахалинского разлома произошло несколько сильных землетрясений, в том числе Лесогорско-Углегорское 1924 г. $M_w = 6.7$ и Углегорское 2000 г. $M_w = 6.8$ [5] (рис. 1 а). Несколько меньшая сейсмичность присуща зоне Центрально-Сахалинского разлома (включая оперяющий его Апреловский разлом). В районе Онорского сегмента этого разлома за инструментальный период сейсмологических наблюдений произошло несколько землетрясений с $M \approx 5.0$. Однако по результатам палеосейсмологических исследований разлом способен генерировать землетрясения с $M = 7.0\text{--}7.5$ [16].

Сильнейшим сейсмическим событием в центральной части о. Сахалин за период GNSS-наблюдений (2000–2023 гг.) явилось Онорское землетрясение 14.08.2016 г. $M_w = 5.8$, удаленное от поперечного профиля на

65 км [17]. Очаг землетрясения был приурочен к одной из вторичных структур Центрально-Сахалинского взбросо-надвига – оперяющему разлому, секущему Западно-Сахалинские горы в направлении побережья (рис. 1 б). Коровых землетрясений с $M \geq 3$ в ближайших окрестностях геодинамической сети не зафиксировано.

Геодинамическая сеть, аппаратура и методы исследований

Геодинамические GNSS-исследования в центральной части Сахалина начаты спустя три месяца после Углегорского землетрясения 4(5).08.2000 г. $M_w = 6.8$. На начальном этапе сеть состояла из шести пунктов поперечного профиля, пересекающего островную сушу на широте около 50°N (BOSH, AIVA, PBDN, PERV, PILG и HUIZ), и опорного пункта UGLG (г. Углегорск), расположенного южнее профиля на западном побережье острова (рис. 1 б). В качестве геодезических центров на пунктах поперечного профиля использованы грунтовые реперы трубчатой конструкции. Пункт UGLG представляет собой металлический пилон, заложенный бурением на глубину ~ 3 м, с площадкой принудительного центрирования антенны (рис. 2 а). Для долговременной стабильности реперы закладывались ниже глубины наибольшего промерзания грунта в районе исследований, а их якоря и нижняя часть пилона бетонировались.

В 2002 и 2005 гг. были проведены повторные GNSS-измерения геодинамической сети и получены первые сведения о величинах скоростей современных горизонтальных движений земной поверхности [4]. В августе 2009 г. в рамках Целевой комплексной программы научных исследований ДВО РАН «Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России» пункт UGLG переведен в непрерывный режим регистрации данных [18] (рис. 2 б). В 2011 г. на профиле были заложены новые промежуточные центры (SHIR, CARE, PRVL и ZIMN), что позволило детализировать региональные гео-

динамические исследования (рис. 1 б). Последнее измерение всей сети проведено в 2023 г.

На поперечном профиле измерения выполнялись двухчастотными приемниками AshTech Z-XII и Trimble NetRS с антеннами типа Choke Ring и Trimble Zephyr Geodetic, при этом на всех пунктах использовались те же антенны, что и в предшествующие эпохи наблюдений (рис. 3). Для минимизации сезонного влияния на точность позиционирования полевые работы проводились в летне-осенний период. Антенны закрепляли на стандартных штативах, их центрирование осуществлялось с помощью оптического центрира Carl Zeiss (Jena) с ценой деления 3'. Высоты антенн измерялись с точностью 0.1 мм и контролировались, как и центрирование, после выполнения наблюдений.

Продолжительность измерительной сессии на каждом пункте поперечного профиля

составляла не менее 3 суток. Суточные файлы формировались с 30-секундной дискретностью и маской возвышения спутников от 5°. Обработка данных осуществлялась с использованием специализированного пакета программного обеспечения Bernese 5.2 [19]. Высокая точность результатов измерений достигалась после учета различных поправок в процессе обработки. При этом использовались финальные орбиты спутников, представленные IGS (International GNSS Service), параметры ориентации вращения Земли IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), таблицы зависимостей фазовых центров антенн, параметры Солнца и Луны и другие материалы, рекомендованные Международной GNSS службой. В качестве примера на рис. 4 показаны результаты суточных измерений на пункте AIVA в 2023 г.

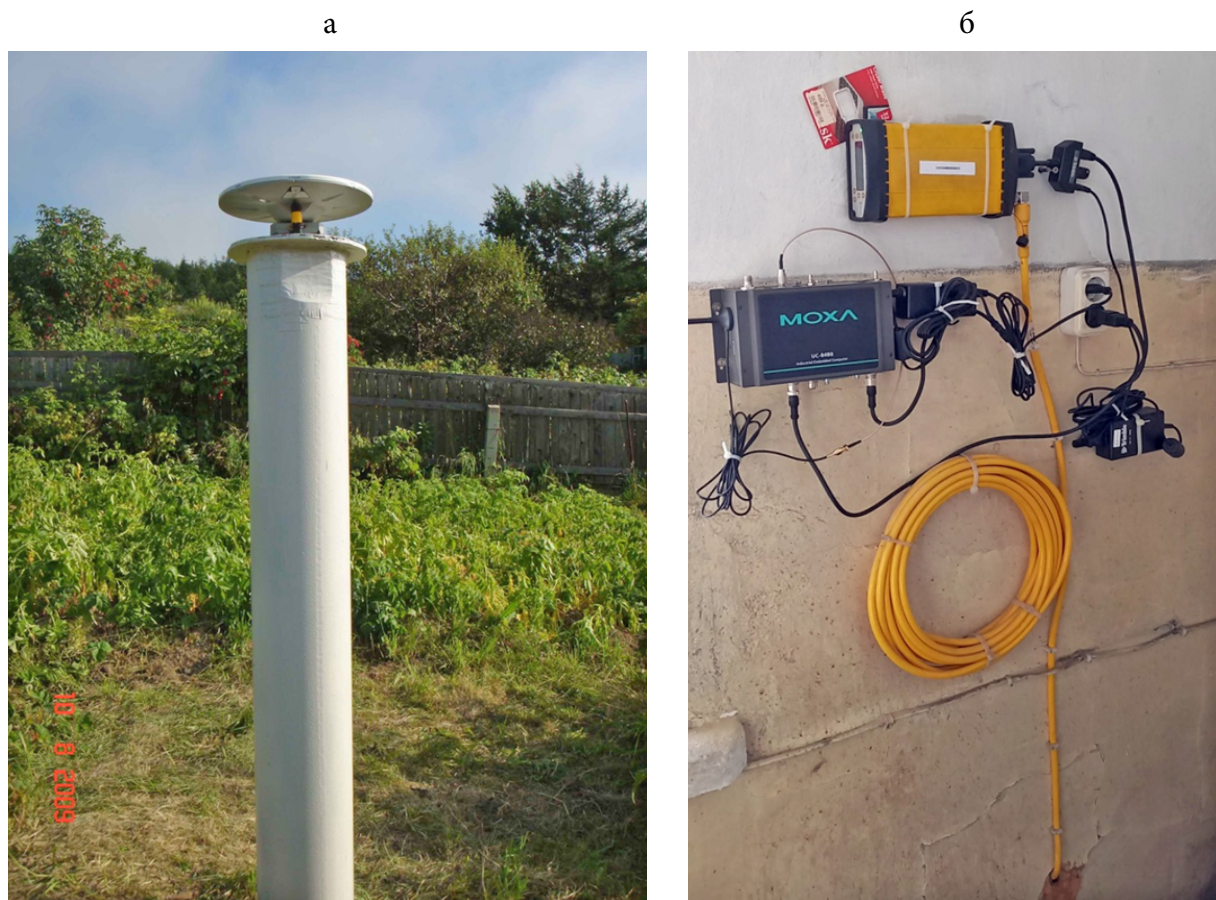


Рис. 2. Станция непрерывной регистрации UGLG (г. Углегорск): а – пилон с антенной Trimble Zephyr Geodetic Mod. 2; б – GNSS приемник Trimble NetR5.

Fig. 2. UGLG station of permanent registration (Uglegorsk town): (a) pylon with antenna Trimble Zephyr Geodetic Mod. 2; (b) GNSS receiver Trimble NetR5.



Рис. 3. GNSS наблюдения в 2023 г.: а – на пункте PERV с антенной ChokeRing; б – на пункте ZIMN с антенной Zephyr Geodetic.
Fig. 3. GNSS observations in 2023: (a) at PERV point with ChokeRing antenna; (b) at ZIMN point with Zephyr Geodetic antenna.

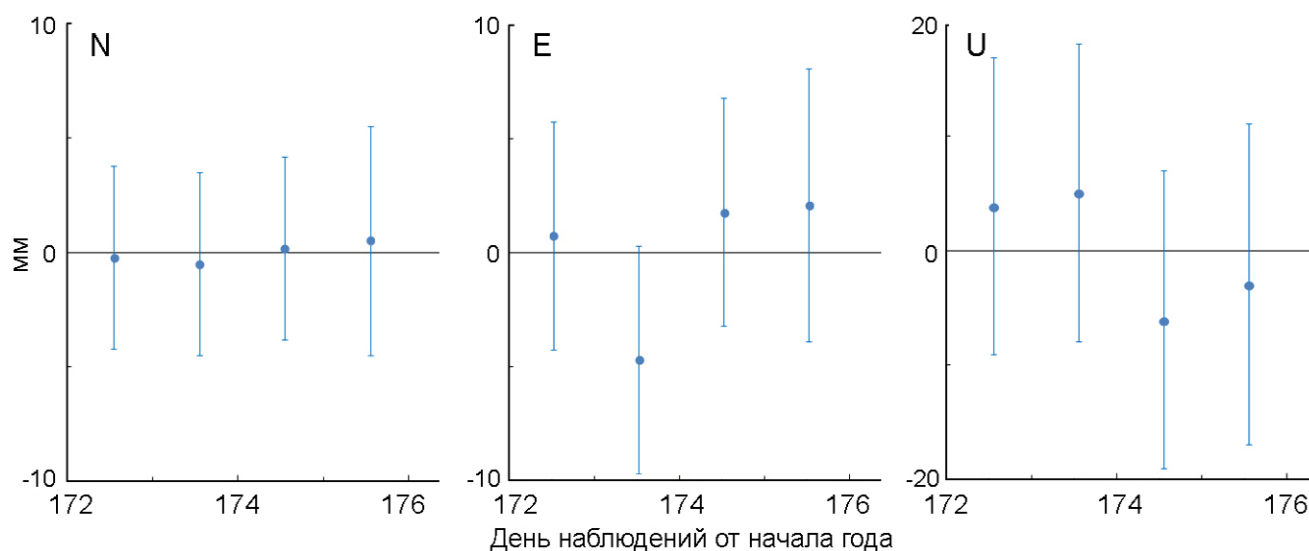


Рис. 4. Графики суточной повторяемости координат пункта AIVA в 2023 г. относительно станции UGLG по компонентам: N – север, E – восток, U – вверх. Априорная оценка точности суточных измерений показана вертикальными линиями вверх–вниз от каждой точки.

Fig. 4. Plots of diurnal coordinate repetition of AIVA point in 2023 relative to UGLG station by components: N, north; E, east; U, up. A priori estimation of diurnal observation accuracy is shown by vertical lines up and down from each point.

Результаты и обсуждение

Скорости современных движений земной поверхности центральной части о. Сахалин определены для 11 пунктов сети, на которых с 2000 по 2023 г. было проведено от 2 до 5 циклов GNSS-измерений. За весь период наблюдений в районе исследований не зарегистрировано крупных сейсмических событий, а трехмесячный интервал времени после сильнейшего Углегорского землетрясения до первой эпохи измерений дает основание полагать, что полученные скорости не подвержены влиянию постсейсмических эффектов, сопровождавших землетрясение. Поэтому скорости смещений пунктов можно уверенно отнести к межсейсмическим скоростям, свободным от влияния сейсмических событий. Для выделения составляющих, обусловленных пограничным деформированием в контексте тектонического строения района исследований, окончательные результаты представлены в виде скоростей смещений пунктов относительно удаленной станции UGLG (г. Углегорск). Временные ряды изменения координат одного из пунктов – пункта AIVA – показаны на рис. 5. Схемы скоростей горизонтальных и вертикальных смещений представлены на рис. 6.

Горизонтальные скорости всех пунктов достоверны, среднеквадратические ошибки определения их компонент не превышают 0.2 мм/год. Ошибки вертикальных скоростей пунктов, наблюдавшихся в 2000–2023 гг., варьи-

руют в пределах 0.2–0.4 мм/год; для большинства пунктов, наблюдавшихся в 2011–2023 гг., не превышают 0.5 мм/год, и только на пункте PRVL ошибка достигает 0.8 мм/год.

Горизонтальные движения

Векторы горизонтальных смещений пунктов поперечного профиля в основном демонстрируют взаимную согласованность. Их скорости достаточно монотонно возрастают с запада на восток, достигая максимальных значений 3.2 мм/год на пунктах ZIMN и HUZL. К востоку от Центрально-Сахалинского разлома скорости меняют свое направление от ЮЮЗ на ЮЗ. Кинематика района в целом свидетельствует о субширотном сжатии островной суши со скоростью ~2 мм/год и правостороннем сдвиге ~2.5 мм/год. Такая картина горизонтальных движений соответствует тектоническому режиму зоны конвергенции Евразийской и Североамериканской (Охотской) литосферных плит и находит отражение в направлениях регионального тензора напряжений сжатия по данным механизмов очагов землетрясений [20].

На основе горизонтальных скоростей смещений пунктов вычислены среднегодовые скорости деформаций земной поверхности. Расчет осуществлялся по методике [21], которая реализует подход модифицированного метода наименьших квадратов [22]. На основе полученных собственных значений

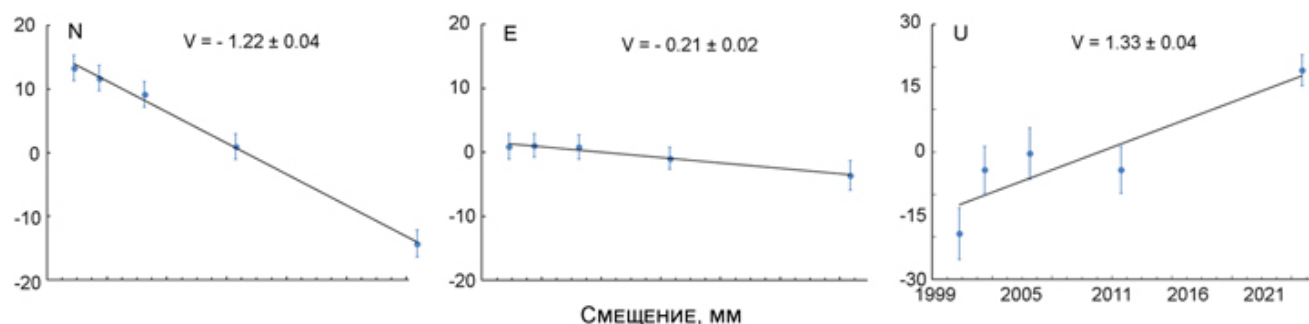


Рис. 5. Временные ряды изменения координаты пункта AIVA за период 2000–2023 гг. относительно станции UGLG по компонентам: N – север, E – восток, U – вверх. Прямой линией показана линейная аппроксимация временного ряда, вертикальными линиями вверх–вниз от каждой точки – априорная оценка точности наблюдений..

Fig. 5. Coordinate time series of AIVA point for the period from 2000 to 2023 relative to UGLG station by components: N, north; E, east; U, up. The straight line shows linear approximation of the time series, a priori estimation of observation accuracy is shown by vertical lines up and down from each point.

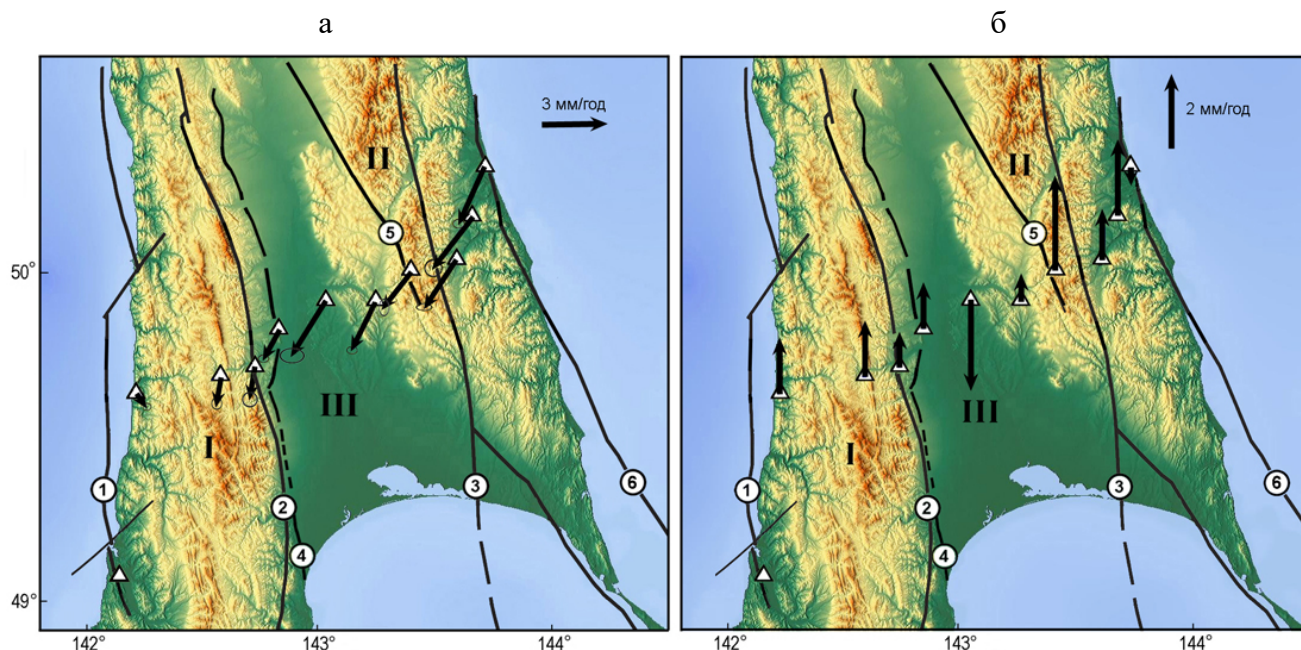


Рис. 6. Схемы скоростей горизонтальных (а) и вертикальных (б) смещений пунктов поперечного профиля за период 2000–2023 гг. относительно станции UGLG (г. Углегорск). Эллипсом показаны 1σ ошибки горизонтальных скоростей. Условные обозначения см. рис. 1.

Fig. 6. Schemes of horizontal (a) and vertical (b) rates of the displacement of transversal profile points for the period from 2000 to 2023 relative to UGLG station (Uglegorsk town). Ellipse indicates 1σ errors of horizontal rates. For symbols, see Fig. 1.

тензора скорости деформаций вычислены скорости плоской деформации (дилатации).

Центральный сегмент острова в целом характеризуется весьма неоднородным характером деформирования земной поверхности с преобладанием условий одноосного сжатия (рис. 7). В распределении деформаций можно выделить несколько областей с различной геодинамической обстановкой.

Район между Западно-Сахалинским и Центрально-Сахалинским разломами испытывает практически одноосное сжатие ЮЗ-СВ направления со скоростью $(-20 \dots -30) \times 10^{-9}$ в год.

Максимальные скорости горизонтальных деформаций (до $|45-50| \times 10^{-9}$ в год) приурочены к зоне Центрально-Сахалинского взбросо-надвига и его ближайшим окрестностям. Скорости сжатия и растяжения здесь практически сопоставимы (скорость дилатации не превышает -5×10^{-9} в год). Правосторонний сдвиг в зоне разлома (~ 1 мм/год) подтверждает его кинематику по данным геолого-геоморфологических исследований [14].

Наиболее интенсивное сокращение земной поверхности в направлении СЗ-ЮВ

происходит в восточной части района между Пограничным и Хоккайдо-Сахалинским разломами, где скорость дилатации достигает -45×10^{-9} в год. К западу от Первомайского раз-

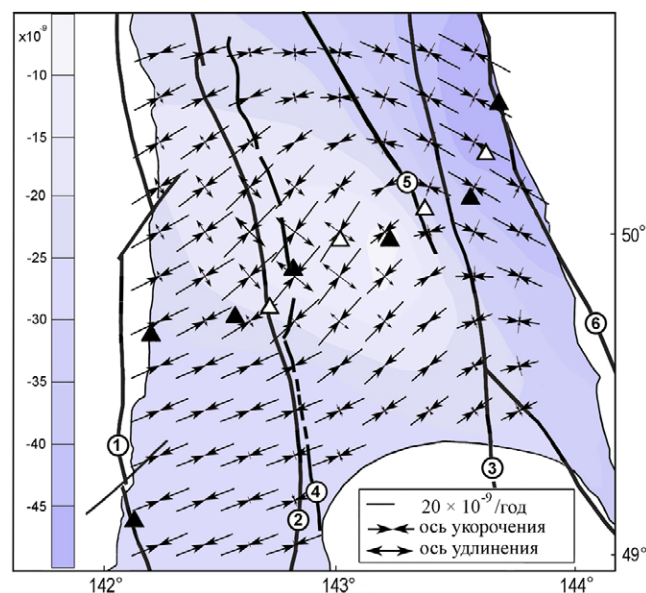


Рис. 7. Скорости дилатации и горизонтальных деформаций земной поверхности центральной части о. Сахалин за 2000–2023 гг. Остальные условные обозначения см. рис. 1.

Fig. 7. The rates of dilation and horizontal deformations of the earth's surface in Central Sakhalin for the period from 2000 to 2023. For symbols, see Fig. 1.

лома СЗ-ЮВ ориентация деформаций сжатия меняет свое направление на ЮЗ-СВ. Непосредственно в зоне Хоккайдо-Сахалинского взбросо-надвига, судя по векторам горизонтальных скоростей пунктов PRVL и PILG, наблюдается небольшое (в пределах ошибок) правостороннее смещение со скоростью ~ 0.4 мм/год.

По сравнению с предыдущим периодом наблюдений [6] качественных изменений в характере деформирования района исследований не происходит, однако полученные с увеличением количества пунктов наблюдательной сети оценки являются более надежными.

Вертикальные движения

Скорости вертикальных смещений пунктов поперечного профиля на начальном этапе определены относительно опорной станции UGLG, которая расположена в 2.5 км от мареографического (уровнемерного) поста. По результатам исследований Г.Г. Якушко вертикальная скорость ближайших окрестностей островной суши относительно уровня моря (без учета эвстатического подъема уровня Мирового океана) за расчетный период 1964–1986 гг. составляла 0.0 ± 0.5 мм/год [23]. К сожалению, в дальнейшем эти исследования не выполнялись, поэтому абсолютная скорость поднятия опорной станции оценена величиной 2.0 ± 0.6 мм/год путем добавления скорости эвстатического подъема уровня Мирового океана (1.96 ± 0.20 мм/год) на среднюю дату расчетного периода [9].

Приведение вертикальных скоростей пунктов к абсолютным значениям выполнено добавлением абсолютной скорости опорной станции, приняв ее неизменной (рис. 8). Среднеквадратические ошибки абсолютных скоростей за период 2000–2023 гг. не превышают 0.7 мм/год; на пунктах, наблюдавшихся только в 2011 и 2023 гг., достигают 1.0 мм/год. Тем не менее, практически все скорости достоверны, поскольку их величины превышают 3 среднеквадратические ошибки. Исключением является только абсолютная скорость опу-

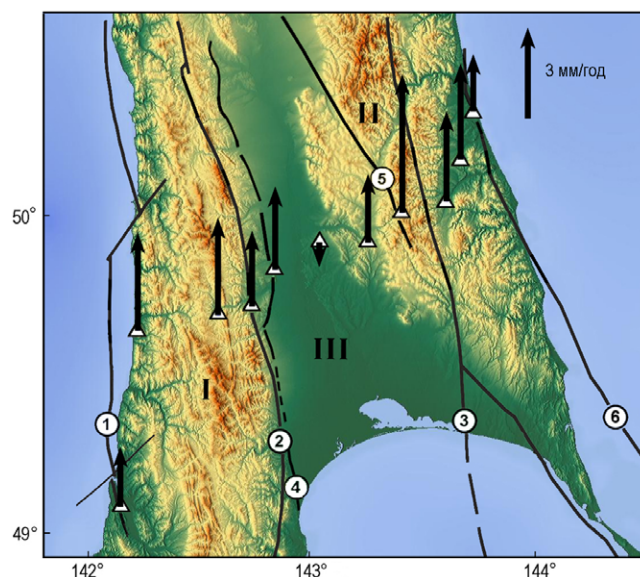


Рис. 8. Схема абсолютных вертикальных скоростей пунктов геодинимической сети центральной части о. Сахалин. Условные обозначения см. рис. 1.

Fig. 8. Scheme of the absolute vertical rates of the points of Central Sakhalin geodynamic network. For symbols, see Fig. 1.

скания пункта CARE, сопоставимая с ошибкой ее определения.

Скорости пунктов поперечного профиля, пересекающего Восточно-Сахалинское поднятие, неоднородны. Центральная его часть (пункты PRVL, PILG и ZIMN) воздымается со средней скоростью 3.9 мм/год. Максимальная скорость поднятия (4.7 мм/год) отмечается на пункте PRVL с самой большой высотной отметкой (792 м) на всем профиле. Пункты HUZU и PERV, расположенные, соответственно, в краевой впадине на востоке поднятия и вблизи западного его борта, поднимаются, соответственно, со скоростью 1.8 и 2.3 мм/год.

В зоне Западно-Сахалинского поднятия пункты BOSH, AIVA, SHIR и PBDN испытывают поднятие со скоростью 2.5–3.3 мм/год. Меньшая скорость опорной станции UGLG (2.0 мм/год), скорее всего, обусловлена ее расположением в западной подзоне относительно опущенных структур этого поднятия.

Для неотектонического этапа развития о. Сахалин на основе геолого-геоморфологических исследований установлено, что главной тенденцией современных движений является направленное воздымание поднятий, на фоне которых лишь некоторые районы

испытывают относительное погружение [24]. Однако количественные оценки этих движений практически отсутствуют. Только для западного побережья острова по результатам нивелировки морских береговых валов и составлению продольных профилей по прибрежным террасам средняя скорость поднятия оценена величиной 2.5–3 мм/год.

Абсолютные вертикальные движения центральной части острова по данным GNSS-наблюдений имеют унаследованный характер по отношению к новейшим структурам и дают количественную оценку их вековых скоростей. Положительные структуры воздымаются со средней скоростью ~3 мм/год, в то время как разделяющий их прогиб с незначительной скоростью опускается. Абсолютные скорости станции UGLG и пункта BOSH (2.0 и 3.3 мм/год соответственно) хорошо согласуются с неотектонической оценкой скорости поднятия западного побережья острова. Локальные неоднородности неотектонических структур Западно-Сахалинского и Восточно-Сахалинского поднятий находят отражение в скоростях их вертикальных движений. Согласуется с геолого-геоморфологическими исследованиями и некоторое нарастание с запада на восток острова амплитуд и градиентов скоростей вертикальных движений.

Карта современных вертикальных движений земной коры о. Сахалин в районе GNSS-исследований охватывала только территорию Западно-Сахалинского поднятия [7, 8]. В зоне этого поднятия линии повторного нивелирования проходили в окрестностях 5 пунктов геодинимической сети, что позволило сравнить абсолютные вертикальные скорости земной поверхности, полученные двумя различными методами. Расчеты показывают, что карта СВДЗК, после коррекции исходных данных ближайших уровнемерных постов (Углегорска и Поронайска), приведенных в более поздней работе [23], и учета поправки за эвстатический подъем уровня Мирового океана [9], может быть информативной (в пределах ее точности) для оценки вековых вертикальных движений центральной части острова.

Заключение

На основе межсейсмических скоростей пунктов геодинимической GNSS сети за период 2000–2023 гг. детализирована сложная картина современных горизонтальных деформаций земной поверхности и оценены вековые вертикальные движения неотектонических структур центральной части о. Сахалин.

Район исследований характеризуется неоднородным деформированием с преобладанием условий одноосного горизонтального сжатия земной поверхности. Максимальное сокращение земной поверхности происходит между Пограничным и Хоккайдо-Сахалинским разломами, где скорость дилатации достигает -45×10^{-9} в год. Область минимальных скоростей дилатации $(-5 \dots -10) \times 10^{-9}$ в год и интенсивных деформаций правостороннего сдвига приурочена к зоне Центрально-Сахалинского разлома и его ближайшим окрестностям. Скорости деформаций сжатия и растяжения здесь сопоставимы по величине и достигают максимальных значений (до $|45-50| \times 10^{-9}$ в год).

Кинематика района в целом свидетельствует о сжатии островной суши со скоростью ~2 мм/год и правостороннем сдвиге ~2.5 мм/год, что соответствует современному тектоническому режиму региона. Правосторонний сдвиг в зоне Центрально-Сахалинского взбросо-надвига (~1 мм/год) подтверждает его кинематику по данным геолого-геоморфологических исследований. В зоне Хоккайдо-Сахалинского взбросо-надвига проявляются признаки (в пределах ошибок) правостороннего сдвига со скоростью ~0.4 мм/год.

Абсолютные межсейсмические вертикальные движения земной поверхности центральной части острова подтверждают общую тенденцию неотектонических движений. По отношению к новейшим структурам они имеют унаследованный характер и дают количественную оценку вековых скоростей. Превалирующие воздымания со скоростью ~3 мм/год проявляются в пределах Западно-Сахалинского и Восточно-Сахалинского поднятий. Локальные их неоднородности находят

отражение в скоростях вертикальных движений. Небольшое опускание земной поверхности происходит в Тымь-Поронайском прогибе.

Результаты GNSS-наблюдений, в отличие от карты современных вертикальных движений земной коры о. Сахалин, позволили получить первую оценку вековых вертикальных движений всех неотектонических структур района исследований. Карта СВДЗК, в центральном сегменте острова ограниченная Западно-Сахалинским поднятием и Тымь-Поронайским прогибом, может быть информативной для оценки вековых движений после коррекции исходных мареографических данных и учета поправки за эвстатический подъем уровня Мирового океана.

Полученные оценки накопления деформаций земной коры имеют принципиальное значение для исследования процессов подготовки землетрясений в центральной части о. Сахалин.

Список литературы

- Chapman M.E., Solomon S.C. **1976**. North American-Eurasian plate boundary in northeast Asia. *J. of Geophysical Research: Solid Earth and Planets*, 81(5): 921–930. <https://doi.org/10.1029/JB081i005p00921>
- Zonenshain L.P., Savostin L.A. **1981**. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia. *Tectonophysics*, 76(1-2): 1–45. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90251-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90251-1)
- Fournier V., Jolivet L., Huchon P., Sergeyev K.F., Ostorbin L.S. **1994**. Neogene strike-slip faulting in Sakhalin and the Japan Sea opening. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B2): 2701–2725. <https://doi.org/10.1029/93JB02026>
- Василенко Н.Ф., Прытков А.С. **2012**. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений. *Тихоокеанская геология*, 31(1): 42–48.
- Поплавская Л.Н. (ред.) **2006**. *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.* Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.
- Прытков А.С., Василенко Н.Ф. **2018**. Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPS-наблюдений. *Геодинамика и тектонофизика*, 9(2): 503–514. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0358>
- Карта современных вертикальных движений земной коры о. Сахалин: 1:1 250 000*. **1980**. Хабаровск: ГУТК.
- Сергеев К.Ф., Никитенко Ю.П., Шульман В.А., Золотарская С.Б., Захаров В.К., Семакин В.П., Якушко Г.Г. **1981**. Современные вертикальные движения земной коры о. Сахалин. *Доклады АН СССР*, 257(1): 202–204.
- Church J.A., White N.J. **2006**. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, 33: L01602. <https://doi.org/10.1029/2005GL024826>
- DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., **2010**. Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181: 1–80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>
- Харахинов В.В. **2010**. *Нефтегазовая геология Сахалинского региона*. М.: Научный мир, 276 с.
- Мельников О.А. **1987**. *Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области*. М.: Наука, 95 с.
- Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. **2007**. *Неотектоника и активные разрывы Сахалина*. М.: Наука, 186 с.
- Рождественский В.С. **1982**. Роль сдвигов в структуре Сахалина. *Геотектоника*, (4): 99–111.
- Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. **1984**. Разломы Сахалина. *Тихоокеанская геология*, (2): 77–87.
- Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У., Сергеев К.Ф., Стрельцов М.И., Кожурин А.И., Бесстрашных В.М., Стром А.Л., Сузуки Я., Цуцуми Х., Ватанабе М., Уеки Т., Шимамото Т., Окумура К., Гото Х., Кария Я. **2002**. Активные разломы северо-восточного Сахалина. *Геотектоника*, (3): 66–86.
- Прытков А.С., Сафонов Д.А., Полец А.Ю. **2018**. Модель очага Онорского землетрясения 14 августа 2016 г. Mw=5.8 (о. Сахалин). *Тихоокеанская геология*, 37(5): 112–119. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2018-37-5-112-119>
- Быков В.Г., Шестаков Н.В., Герасименко М.Д., Сорокин А.А., Коновалов А.В., Прытков А.С., Василенко Н.Ф., Сафонов Д.А., Коломиец А.Г., Серов М.А., Пупатенко В.В., Королев С.П., Михайлов К.В., Жижерин В.С., Рябинкин К.С. **2020**. Единая сеть геодинамических наблюдений ДВО РАН: становление, 10 лет развития, основные достижения. *Вестник ДВО РАН*, 3(211): 5–24. <https://doi.org/10.37102/08697698.2020.211.3.001>
- Dach R., Andritsch F., Arnold D., Thaller D. **2015**. *Bernese GNSS Software Version 5.2*. Astronomical Institute of University of Berne, 852 p.
- Коновалов А.В., Степнов А.А., Гаврилов А.В., Манайчев К.А., Сычев А.С., Клячков В.А., Сабуров М.С. **2016**. Особенности региональной сейсмичности на севере о. Сахалин в связи с про-

мышленным освоением месторождений нефти и газа на шельфе. *История науки и техники*, 6: 63–71.

21. Teza G., Pesci A., Galgaro A. **2008**. Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments. *Computers & Geosciences*, 34(9): 1142–1153. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.006>
22. Shen Z.K., Jackson D.D., Ge B.X. **1996**. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B12): 27957–27980. <https://doi.org/10.1029/96jb02544>
23. Никонов А.А. **1995**. Современные вертикальные движения берегов на юге Дальнего Востока. *Нефтегорское землетрясение 27(28).05.1995 г.: Информационно-аналитический бюллетень ФССН*, спец. выпуск. М., с. 80–94.
24. Верецагин В.Н., Ковтунович Ю.М. (ред.) **1970**. *Геология СССР. Т. 33. Остров Сахалин. Геологическое описание*. М.: Недра, 432 с.
1. Chapman M.E., Solomon S.C. **1976**. North American-Eurasian plate boundary in northeast Asia. *J. of Geophysical Research: Solid Earth and Planets*, 81(5): 921–930. <https://doi.org/10.1029/JB081i005p00921>
2. Zonenshain L.P., Savostin L.A. **1981**. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia. *Tectonophysics*, 76(1-2): 1–45. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90251-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90251-1)
3. Fournier V., Jolivet L., Huchon P., Sergeyev K.F., Ostorbin L.S. **1994**. Neogene strike-slip faulting in Sakhalin and Japan Sea opening. *J. of Geophysical Research: Solid Earth, American Geophysical Union*, 99(B2): 2701–2725. <https://doi.org/10.1029/93JB02026>
4. Vasilenko N.F., Prytkov A.S. **2012**. GPS-based modeling of the interaction between the lithospheric plates in Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology*, 6(1): 35–41. <https://doi.org/10.1134/S1819714012010137>
5. Poplavskaya L.N. (ed) **2006**. [Regional catalogue of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005]. [Yuzhno-Sakhalinsk: IMG FEB RAS], 103 p. (In Russ.).
6. Prytkov A.S., Vasilenko N.F. **2018**. Earth surface deformation of the Sakhalin Island from GPS data. *Geodynamics & Tectonophysics*, 9(2): 503–514. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0358>
7. [A map of recent vertical crustal movements of Sakhalin Island]: 1:1 250 000. **1980**. Khabarovsk: GUGK. (In Russ.).
8. Sergeev K.F., Nikitenko Y.P., Shulman V.A., Zolotar-skaya S.B., Zakharov V.K., Semakin V.P., Yakushko G.G. **1981**. [Recent vertical crustal motion of Sakhalin Island]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 257: 202–204. (In Russ.).
9. Church J.A., White N.J. **2006**. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, 33: L01602. <https://doi.org/10.1029/2005GL024826>
10. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., **2010**. Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181: 1–80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>
11. Kharakhinov V.V. **2010**. *Oil and gas geology of the Sakhalin region*. Moscow: Scientific World, 276 p. (In Russ.).
12. Melnikov O.A. **1987**. [Structure and geodynamics of the Hokkaido-Sakhalin folded area]. Moscow: Nauka, 95 p. (In Russ.).
13. Voeikova O.A., Nesmeyanov S.A., Serebryakova L.I. **2007**. [Neotectonics and active faults of Sakhalin]. Moscow: Nauka, 186 p. (In Russ.).
14. Rozhdestvensky V.S. **1982**. [The role of shifts in the formation of the Sakhalin structure]. *Geotectonics*, (4): 99–111. (In Russ.).
15. Kharakhinov V.V., Galtsev-Bezyuk S.D., Tereshchenkov A.A. **1984**. [Faults of Sakhalin Island]. *The Pacific Geology*, (2): 77–87. (In Russ.).
16. Bulgakov R.F., Ivashchenko A.I., Kim Ch.U., Sergeev K.F., Streltsov M.I., Kozhurin A.I., Besstrashnov V.M., Strom A.L., Suzuki Y., Tsutsumi H., Watanabe M., Ueki T., Shimamoto T., Okumura K., Goto H., Kariya Y. **2002**. Active faults in northeastern Sakhalin. *Geotectonics*, (3): 66–86. (In Russ.).
17. Prytkov A.S., Safonov D.A., Polets A.Yu. **2018**. Model of the source of the Mw = 5.8 Onor earthquake, August 14, 2016, Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology*, 12: 443–449. <https://doi.org/10.1134/S1819714018050093>
18. Bykov V.G., Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Sorokin A.A., Konovalov A.V., Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Safonov D.A., Kolomiets A.G., Serov M.A., Pupatenko V.V., Korolev S.P., Verkhoturov A.L., Zhizherin V.S., Ryabinkin K.S. **2020**. Unified observation network for geodynamic monitoring in FEB RAS: formation, 10 years of development and major achievements. *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*, (211): 5–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.37102/08697698.2020.211.3.001>
19. Dach R., Andritsch F., Arnold D., Thaller D. **2015**. *Bernese GNSS Software Version 5.2*. Astronomical Institute of University of Berne, 852 p.
20. Konovalov A.V., Stepnov A.A., Gavrilov A.V., Manaychev K.A., Sychoy A.S., Klachkov V.A., Saburov M.S. **2016**. [Regional seismicity behavior in the Northern Sakhalin in connection to offshore oil and gas fields

- production]. *History of Science and Engineering*, 6: 63–71 (In Russ.).
21. Teza G., Pesci A., Galgaro A. **2008**. Grid strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments. *Computers & Geosciences*, 34(9): 1142–1153. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.006>
 22. Shen Z.K., Jackson D.D., Ge B.X. **1996**. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B12): 27957–27980. <https://doi.org/10.1029/96jb02544>
 23. Nikonov A.A. **1995**. [Modern vertical coastal movements in the south of the Far East]. *Neftegorsk earthquake 27(28).05.1995: Information Analysis Bulletin FSSN*, special issue. Moscow, p. 80–94. (In Russ.).
 24. Vereshchagin V.N., Kovtunovich Yu.M. (eds) **1970**. *Geology of the USSR. Vol. 33. Sakhalin Island. Geological description*. Moscow: Nedra, 432 p. (In Russ.).

Об авторах

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

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

Фролов Дмитрий Игоревич (<https://orcid.org/0000-0002-7262-0386>), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, dm.frolov@mail.ioffe.ru

Тен Александр Сергеевич (<https://orcid.org/0009-0007-2469-3584>), научный сотрудник, Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, alexander.s.ten@yandex.ru

About the Authors

Vasilenko, Nikolay F. (<https://orcid.org/0000-0003-1591-9071>), Cand. in Engineering, Lead Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, n.vasilenko@imgg.ru

Prytkov, Alexander S. (<https://orcid.org/0000-0003-4488-1682>), Cand. in Physics and Mathematics, Lead Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, a.prytkov@imgg.ru

Frolov, Dmitry I. (<https://orcid.org/0000-0002-7262-0386>), Cand. in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Ioffe Physical-Technical Institute, RAS, Saint Petersburg, dm.frolov@mail.ioffe.ru

Ten, Alexander S. (<https://orcid.org/0009-0007-2469-3584>), Researcher, Computing Center, FEB RAS, Khabarovsk, alexander.s.ten@yandex.ru

Поступила 03.06.2025

Принята к публикации 29.06.2025

Received 3 June 2025

Accepted 29 June 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 550.34

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.238-255>
<https://www.elibrary.ru/dcgjno>

Динамические параметры очагов землетрясений на острове Сахалин в 1978–2024 гг.

В. Н. Сычев[@], Л. М. Богомолов

[@]E-mail: koitash@mail.ru

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

Резюме. Получены значения динамических параметров (ДП) для 110 землетрясений с магнитудами $M_w = 4.7–7.7$, произошедших на Сахалине в 1978–2024 гг. Для этих землетрясений ранее был определен скалярный сейсмический момент. Для оценок других ДП: радиусов очагов, сброшенных касательных напряжений и приведенной сейсмической энергии – использовался феноменологический подход, основанный на наличии регрессии, связывающей радиус очага и значения скалярного сейсмического момента для землетрясений на территории Сахалино-Курильского региона. Результаты работы сведены в таблицу данных. Построены карты распределения усредненных значений этих ДП по площади изучаемого региона. Таким образом, значительно увеличен объем данных по сброшенным напряжениям и приведенной сейсмической энергии для сахалинских землетрясений.

Ключевые слова: сейсмичность, землетрясение, каталог, скалярный сейсмический момент, радиус очага, сброс напряжений, остров Сахалин, северо-западная часть Тихого океана

Dynamic parameters of earthquake sources that occurred on Sakhalin Island in 1978–2024

Vladimir N. Sychev[@], Leonid M. Bogomolov

[@]E-mail: koitash@mail.ru

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

Abstract. The values of dynamic parameters (DP) for 110 earthquakes with magnitudes $M_w = 4.7–7.7$ that occurred on Sakhalin in 1978–2024 were obtained. A scalar seismic moment was previously determined for these earthquakes. To estimate the other DP: the radii of the foci, the shear stress drop, and the reduced seismic energy a phenomenological approach was used based on the presence of regression, which links the source radius and the values of the scalar seismic moment for earthquakes within the Sakhalin-Kuril region. The results of the study were summarized in a data table. Distribution maps of the averaged values of these DP across the studied region were constructed. Thus, the amount of data on the stress drop and reduced seismic energy for Sakhalin earthquakes has been significantly increased.

Keywords: seismicity, earthquake, catalog, scalar seismic moment, source radius, stress drop, Sakhalin Island, North-West of the Pacific

Для цитирования: Сычев В.Н., Богомолов Л.М. Динамические параметры очагов землетрясений на острове Сахалин в 1978–2024 гг. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 3, с. 238–255. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.238-255>; <https://www.elibrary.ru/dcgjno>

For citation: Sychev V.N., Bogomolov L.M. Dynamic parameters of earthquake sources that occurred on Sakhalin Island in 1978–2024. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 3, pp. 238–255. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.238-255>

Финансирование и благодарности

Работа проведена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ 075-00604-25). При выполнении работы использовались данные, полученные 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/>; <http://www.gsras.ru/unu/>).

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (No. 075-00604-25). To carry out the study, we used data obtained at the unique scientific installation “Seismic Infrasound Monitoring Complex of the Arctic Cryolithosphere and the complex of continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent territories and the world” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>; <http://www.gsras.ru/unu/>).

Введение

Остров Сахалин и Курильские острова – дальневосточные российские регионы с высоким уровнем сейсмической активности [1–4]. Развитию методов мониторинга напряженно-деформированного состояния геологической среды в Дальневосточном регионе и оценкам вероятности сильного землетрясения (прогнозу) посвящено множество работ, например [2, 4–7]. Тем не менее, совершенствование методов оценки сейсмической опасности в Дальневосточном регионе остается актуальным. Информация о динамических параметрах (ДП) очагов землетрясений: радиусе очага, скалярном сейсмическом моменте M_0 , сброшенных касательных напряжениях $\Delta\sigma$, приведенной сейсмической энергии – может характеризовать региональные особенности деформационного процесса и, таким образом, быть востребована в исследованиях, направленных на возможность предсказания сильных землетрясений. К примеру, временные вариации среднего уровня $\Delta\sigma$ для выборок событий заданных магнитуд являются признаком изменения напряженного состояния земной коры по диаграмме Кулона–Мора.

Для северо-западной части Тихого океана, как и для многих других регионов, значения параметра M_0 определялись регулярно, вместе с восстановлением тензора сейсмического момента. Они представлены на сайте CMT (Centroid Moment Tensor) (Global CMT Catalog Search; <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>). А вот другие ДП для землетрясений в этом регионе и, в частности, на Сахалине исследовались в значительно меньшей степе-

ни. В оригинальной работе [8] представлены данные по всем спектральным (включая предельную спектральную плотность Ω_0 и угловую частоту f_0) и динамическим параметрам очагов 431 землетрясения в северо-западной части Тихого океана, которые произошли в период 1969–1996 гг. Фактически был составлен каталог ДП (автор Р.Н. Бурымская), который до настоящего времени остается наибольшим по числу определений сброшенных напряжений $\Delta\sigma$ в Дальневосточном регионе. Значения $\Delta\sigma$, рассчитанные для модели разрыва очага по Брюну [9, 10], составляют $0.1 \text{ МПа} < \Delta\sigma < 85 \text{ МПа}$. Каталог также содержит значения моментной магнитуды M_w , которые находятся в пределах $4.1 < M_w < 8.7$.

Эпицентральные положения землетрясений из каталога Бурымской представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, подавляющее большинство очагов расположены в зоне вокруг Курильских о-вов, на территорию о. Сахалин попадают всего 8 событий из 431. Это обусловлено расположением Курильских о-вов и наклонной сейсмофокальной зоны мощностью около 70 км [10] (ближней окрестности области субдукции Тихоокеанской плиты). Здесь концентрируются очаги землетрясений и достигается почти максимальная сейсмическая активность на планете. Согласно материалам ежегодников «Землетрясения России» за 2003–2023 гг. (<http://www.gsras.ru/zr/contents.html>), среднее количество тектонических землетрясений с магнитудами $M_w > 1.3$, регистрируемых под акваторией у Южных Курильских о-вов, составляет 2–3 тыс. событий в год. На Сахалине сейсмическая активность носит умеренный характер, она сосредоточена главным образом в земной коре на глубинах 10–30 км.

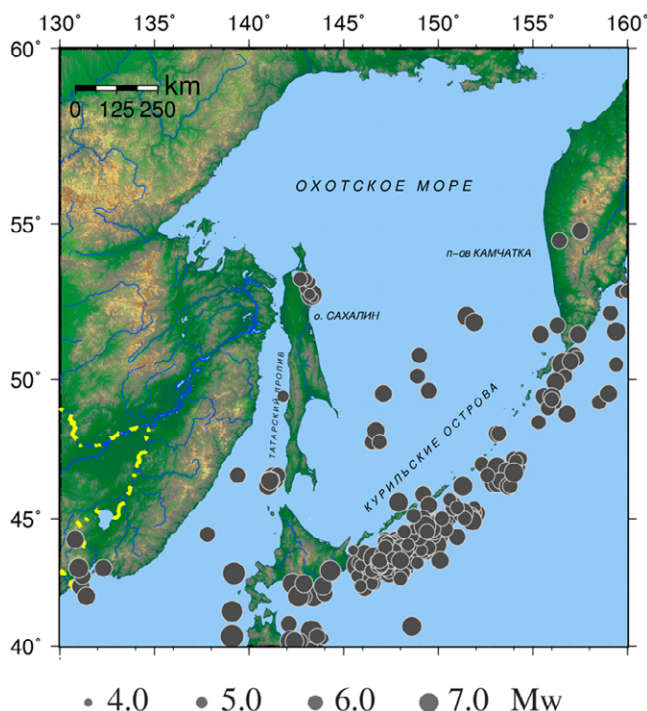


Рис. 1. Расположение эпицентров землетрясений 1969–1996 гг., для которых в [8] были определены спектральные и динамические параметры по записям аналоговых (частотно-избирательных) сейсмостанций.

Fig. 1. Location of epicenters of earthquakes that occurred in 1969–1996, for which spectral and dynamic parameters were determined in [8] based on the records of analog (frequency-selective) seismic stations.

В недавней работе [11] из каталога Бурымской было выделено 264 события в компактном районе Южных Курильских островов и для этой выборки установлено наличие регрессий, связывающих значения радиуса очага r , сброшенных напряжений $\Delta\sigma$ и приведенной сейсмической энергии e_{PR} со значениями сейсмического момента M_0 . Для зависимости $r(M_0)$ отмечен более высокий коэффициент корреляции, чем для других регрессий.

Как продолжение подхода [11] к анализу регрессионных соотношений в данной работе рассматривается возможность их использования для феноменологических оценок сброса напряжений и приведенной сейсмической энергии для землетрясений на о. Сахалин. Целью является создание (расширение) банка данных по динамическим параметрам (в особенности по сброшенным напряжениям и приведенной сейсмической энергии) очагов землетрясений на о. Сахалин и окружающей акватории Охотского и Японского морей

на основе данных о 110 землетрясениях с известным сейсмическим моментом, произошедших в период 1978–2024 гг. Такие оценки ДП могут представлять интерес, поскольку в работах по сейсмичности Сахалина в начале XXI в. (т.е. в последнее 25-летие) внимание было сконцентрировано на кинематических (фокальных), но не динамических параметрах очагов [12, 13].

Методика

Сброшенные напряжения, согласно [9, 10, 14], вычисляются с помощью выражения

$$\Delta\sigma = 7M_0/16r^3. \quad (1)$$

Согласно модели разрыва в очаге [15], величина приведенной сейсмической энергии, т.е. отношения излученной сейсмической энергии E_s к сейсмическому моменту M_0 , также пропорциональна отношению M_0/r^3 и, значит, пропорциональна $\Delta\sigma$. Коэффициент пропорциональности между параметрами e_{PR} и $\Delta\sigma$ зависит только от свойств среды и модели разрыва очага. Для пересчета значений $\Delta\sigma$ на приведенную сейсмическую энергию можно использовать выражение [11]:

$$e_{PR} = (32k^3/7)\Delta\sigma/G \quad (2)$$

где G – средний модуль сдвига, k – коэффициент, зависящий от модели разрыва.

Другая форма выражения для e_{PR} приведена в монографии [16]:

$$e_{PR} = 0.2 \Delta\sigma/\rho V_s^2, \quad (3)$$

где ρ – плотность, V_s – скорость поперечных волн.

Используя соотношение $G = \rho V_s^2$, можно показать, что выражения (2) и (3) эквивалентны [11].

Значения скалярного сейсмического момента M_0 для событий в исследуемом регионе можно получить с сайта CMT (<https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>). При отсутствии экспериментальных данных о радиусах очагов для вычислений $\Delta\sigma$ по формуле (1) можно использовать модельную зависимость радиуса очага от магнитуды $r(M_w)$, например, из хрестоматийной работы Ю.В. Ризниченко

[17]. Все модельные зависимости далее будут приведены в системе измерений СИ.

Как известно, моментная магнитуда M_w связана линейной зависимостью с логарифмом скалярного сейсмического момента (формула Канамори [18]):

$$M_w = 2/3 (\lg(M_0) - 9.1), \quad (4)$$

так что правая часть (1) может быть выражена как функция M_0 . В качестве другой модели $r(M_0)$ для очагов землетрясений в рассматриваемом регионе можно использовать регрессию, основанную на данных [8]. Согласно [17], выражение для радиуса очага (рассчитанного по модели Брюна) записывается в форме

$$\lg(r) = 0.4M_w + 1.5 = 0.27 \lg(M_0) - 0.92. \quad (5)$$

По данным о значениях r , M_0 , M_w для землетрясений из каталога [8] находим следующие регрессионные зависимости для всего каталога.

$$\lg(r) = 0.36M_w + 1.78 = 0.24 \lg(M_0) - 0.4. \quad (6)$$

На рис. 2 показаны графики для обеих модельных зависимостей (шкала радиусов логарифмическая). Также показан разброс значений r (радиуса Брюна [9, 10]) по каталогу Буримской.

Как видно из рис. 2, зависимости $r(M_w)$, полученные по разным источникам, дают близкие значения радиусов очага в диапазоне магнитуд $4.5 \leq M_w \leq 8.5$, куда попадает подавляющее большинство событий из каталога [8]. Для событий с $M_w \leq 6.7$ регрессия (6), основанная на экспериментальных данных, дает для очагов несколько большие значения $r(M_w)$ по сравнению с аппроксимацией (5). Для диапазона магнитуд $M_w > 6.7$ соотношение оценок $r(M_w)$ обратное. Наибольшее различие между значениями $\lg r$ (около 20 %) имеет место для наименьших магнитуд $M_w \sim 4.5$.

В настоящей работе эмпирическая регрессия (6) используется для оценок радиуса очага и последующих оценок $\Delta\sigma$ и e_{PR} , теоретическая аппроксимация (5) – для оценок возможной погрешности в значениях этих параметров.

Регрессионная зависимость (6) позволяет получить оценку радиуса очага для модели

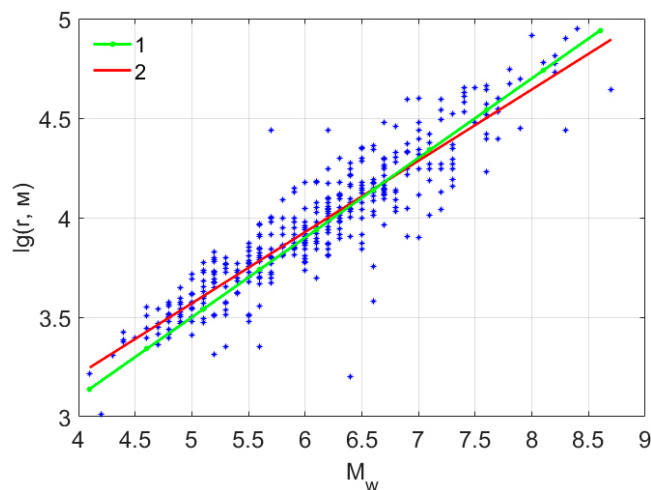


Рис. 2. Модельные зависимости $\lg(r(M_w))$: 1 – теоретическая, согласно обобщению [17], 2 – эмпирическая, по каталогу ДП [8]. Значения радиусов очагов определены по модели Брюна.

Fig. 2. Model dependences $\lg(r(M_w))$: 1, theoretical, according to the summary book [17], 2, empirical, according to the DP catalog [8]. The values of the source radii have been determined by the Brune model.

Брюна [9, 10], так как именно для этой модели разрыва, наиболее распространенной в работах 1980–1990-х годов, в [8] представлены данные о так называемых радиусах Брюна. В работах XXI в. были предложены альтернативные модели разрыва в очаге.

При сравнении значений радиусов очагов по Брюну, рассчитанных через параметр угловой частоты f_0 [9, 14], с наблюдениями косейсмических разрывов, выходящих на дневную поверхность, было установлено, что модель Брюна дает завышенные оценки r [19]. Вследствие этого и обратно пропорциональной зависимости $\Delta\sigma$ от r^3 в формуле (1), оценки сброшенных напряжений могут оказаться в разы ниже реальных значений. Поясним выбор модели разрыва, позволяющей уточнить оценку радиуса очага (6).

В модели Брюна область очага сферическая с радиусом r_B , а смещение происходит одновременно по всей экваториальной плоскости (поверхности разрыва). Модель предполагает, что высокочастотные гармоники сейсмических волн сразу возбуждаются всем круговым разрывом, а не начальным малым участком. Из-за этого и получаются завышенные оценки радиуса $r = r_B$ для данного значения параметра f_0 , характеризующего высокочастотную часть

спектра сейсмических волн. При использовании модели Брюна значение коэффициента k в выражении (2) $k = 0.37$ [11].

В модели Мадариаги [15, 20] в качестве очага предлагается рассматривать растущую с конечной скоростью V_R дисковую трещину, которая останавливается, когда ее радиус достигает максимального значения, называемого радиусом разрушения r_M . Скорость роста трещины заведомо меньше скорости поперечных волн V_S , ее характерные значения $V_R \sim (0.7-0.9) V_S$ [21]. Очаг считается цилиндрически симметричным, а его радиус можно отождествить с величиной r_M . В этой модели выражение, связывающее радиус очага и угловую частоту f_0 , зависит от скорости разрыва V_R , которая остается неопределенным параметром.

В работе [22] приняты во внимание эффекты сцепления (cohesion), существенные для роста трещины такой же формы, как в модели Мадариаги, что позволило уточнить эту модель. Усовершенствованная модель получила название модели Мадариаги–Канеко–Ширера (МКШ). В рамках этой модели показано, что при скорости расширения трещины $V_R \sim 0.9 V_S$ величина радиуса очага при фиксированном f_0 получается равной примерно $0.7 r_B$ (радиуса для модели Брюна). При изменении скорости V_R в пределах $(0.75-0.9) V_S$ эта оценка меняется незначительно в пределах 15 %. Для модели МКШ коэффициент k в формуле (2) равен 0.26, что как раз соответствует соотношению радиусов $r_M \approx 0.7 r_B$. Выбрав модель МКШ, будем пересчитывать «брюновский» радиус, определяемый выражением (6), в радиус для этой модели. При логарифмической записи для перехода к радиусу по модели МКШ достаточно из (5) вычесть поправку $\delta r = |\lg 0.7| = 0.155$.

Исходные данные

Каталог землетрясений, для которых рассчитаны компоненты тензора сейсмического момента, представлен на сайте Global CMT Catalog Search (<https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>). Каталог содержит также значения скалярного сейсмического момента M_0 и

моментной магнитуды M_w для сейсмических событий различных регионов Земли. Для территории о. Сахалин и сопредельных акваторий Охотского и Японского морей из этого источника получены данные для 110 землетрясений с 1978 по 2024 г. На рис. 3 представлено расположение эпицентров этих событий.

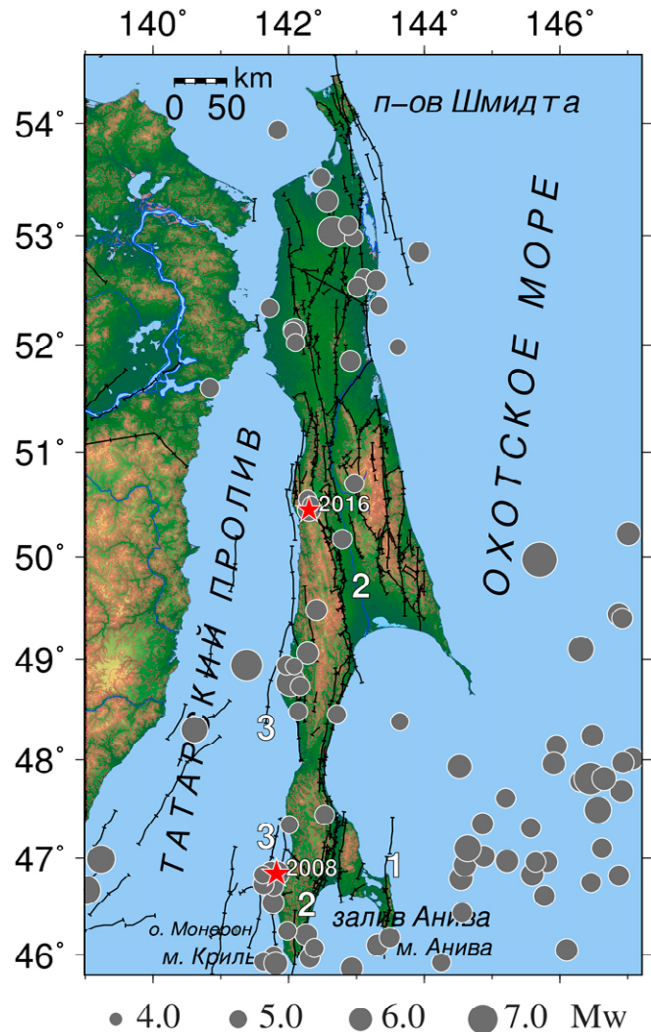


Рис. 3. Распределение эпицентров 110 землетрясений за 1978–2024 гг. по площади изучаемого региона, согласно каталогу CMT (<https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>). Красными звездочками обозначены землетрясения: 2008 – Невельское (2007.08.02, $M_w = 6.3$), 2016 – Онорское (2016.08.14, $M_w = 5.8$). Черными линиями показаны крупнейшие разломы и разломные зоны [23]: 1 – Восточно-Сахалинский (Хоккайдо-Сахалинский) разлом, 2 – Центрально-Сахалинская, 3 – Западно-Сахалинская разломная зона.

Fig. 3. Distribution of the epicenters of 110 earthquakes in 1978–2024 over the studied region, according to the SMT catalog (<https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>). Red stars indicate earthquakes: 2008, Nevelskoye (2007.08.02, $M_w = 6.3$); 2016, Onorsky (2016.08.14, $M_w = 5.8$). Black lines show the largest faults and fault zones, according to [23]: 1, East Sakhalin (Hokkaido-Sakhalin) fault; 2, Central Sakhalin fault zone; 3, West Sakhalin fault zone.

Рис. 3 демонстрирует, что очаги землетрясений на территории Сахалина и прилегающего шельфа приурочены к Западно-Сахалинской и Центрально-Сахалинской разломным зонам, а также к Восточно-Сахалинскому разлому. Такое распределение по площади характерно для событий региональной сейсмичности с магнитудами выше 4.0 [3]. Некоторые количественные характеристики для рассматриваемой выборки из 110 событий (распределение по магнитудам, времени и глубине) представлены на рис. 4. Магнитуда событий находится в пределах $4.7 < M_w < 7.7$, причем сильные события с магнитудой $M_w > 6.0$ составляют 16 % (18 событий). По времени с 1978 по 2024 г. события распределены более или менее равномерно. Распределение по глубине подчеркивает особенности сейсмофокальной зоны в северо-западной части Тихого океана, отмеченные, в частности, в [3].

Глубокофокусные землетрясения происходят преимущественно в районе Охотского моря и сосредоточены в основном в наклонной сейсмофокальной зоне (СФЗ) мощностью около 70 км, простирающейся под материк до глубин около 650 км [3]. Глубина гипоцентров землетрясений, произошедших на Сахалине или прилегающем шельфе, как правило, не превышает 60 км. Учитывая эти особенности глубинного распределения землетрясений, разделим нашу выборку на две части: 48 событий с глубиной гипоцентров менее 60 км и 62 события с гипоцентрами на глубине более 60 км. Распределение ДП удобно рассматривать для этих выборок по отдельности.

Результаты

Результаты расчета динамических параметров 110 землетрясений: радиусов землетрясений по моделям Брюна и Мадариаги–Канеко–Ширера, сброшенных напряжений (для модели МКШ), а также приведенной сейсмической энергии приведены в Приложении. Наряду с этим в Приложении представлена информация о гипоцентрах и величинах скалярного сейсмического момента для этих землетрясений. Полученные значения сброшенных напряжений лежат в пределах $0.7 < \Delta\sigma < 13.5$ МПа, а значения e_{PR} порядка 10^{-4} и лежат в пределах $3 \cdot 10^{-4} < e_{PR} < 5 \cdot 10^{-3}$.

На рис. 5 представлено расположение эпицентров для двух групп землетрясений из каталога СМТ, для которых с помощью выражений (1), (2), (6) были оценены динамические параметры: для событий с очагами на глубине до 60 км и более 60 км.

Ввиду пропорциональности приведенной сейсмической энергии и сброса напряжений, разноцветные значки на рис. 5 характеризуют также и значения e_{PR} по месту расположения эпицентров рассматриваемых событий.

Значения параметров $\Delta\sigma$ и e_{PR} сами по себе относятся к области очага, т.е. к весьма малому объему среды. Поэтому представляет интерес усреднение этих параметров по выборке событий, сформированной по какому-либо признаку (например, по расположению гипоцентров в заданной зоне или одинаковому типу подвижки в очаге). Это, в частности, позволит сопоставить распределение сброшенных

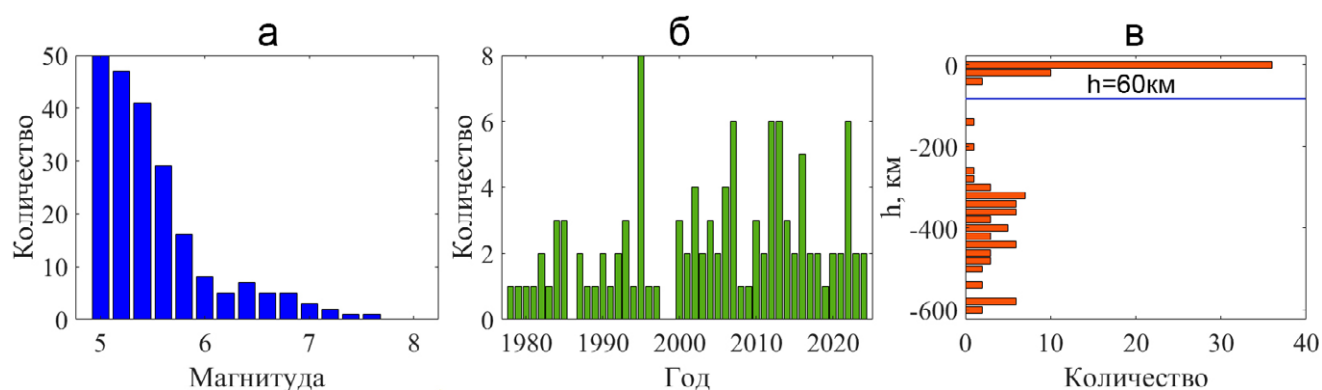


Рис. 4. Распределение 110 землетрясений из каталога СМТ: а – по магнитудам, б – во времени и в – по глубине.

Fig. 4. Distribution of 110 earthquakes from the CMT catalog: a, by magnitudes; б, in time; в, by depth.

напряжений с геодинамической обстановкой и геологическими структурами (которые при необходимости картируются с усреднением по большой площади). Поскольку для очага радиуса r снятие касательных напряжений происходит в объеме порядка r^3 , естественно использовать при усреднении $\Delta\sigma$ средневзвешенное по объему значение этого параметра. В качестве весового множителя для i -го очага можно использовать величину r_i^3 (пропорциональную его объему). Тогда средневзвешенное значение сброшенных напряжений $\langle \Delta\sigma \rangle_V$ будет определяться выражением:

$$\langle \Delta\sigma \rangle_V = \frac{\sum_i \Delta\sigma_i r_i^3}{\sum_i r_i^3} \quad (7)$$

Но так как произведение $\Delta\sigma_i r_i^3 = 7/16 (M_0)_i$, то для средневзвешенного (усредненного по объему) значения сброшенных напряжений получается удобная расчетная формула:

$$\langle \Delta\sigma \rangle_V = \frac{7}{16} \frac{\sum_i (M_0)_i}{\sum_i r_i^3} \quad (8)$$

Стоит отметить, что переход от индивидуальных значений $\Delta\sigma$ к средневзвешенным аналогичен усреднению при переходе от параметров механизма отдельных очагов к параметрам сейсмотектонической деформации [24, 25]. Естественно, что весовые множители для этих случаев различаются.

Используя выражение (8) и регрессию (6), связывающую радиус i -го очага с соответству-

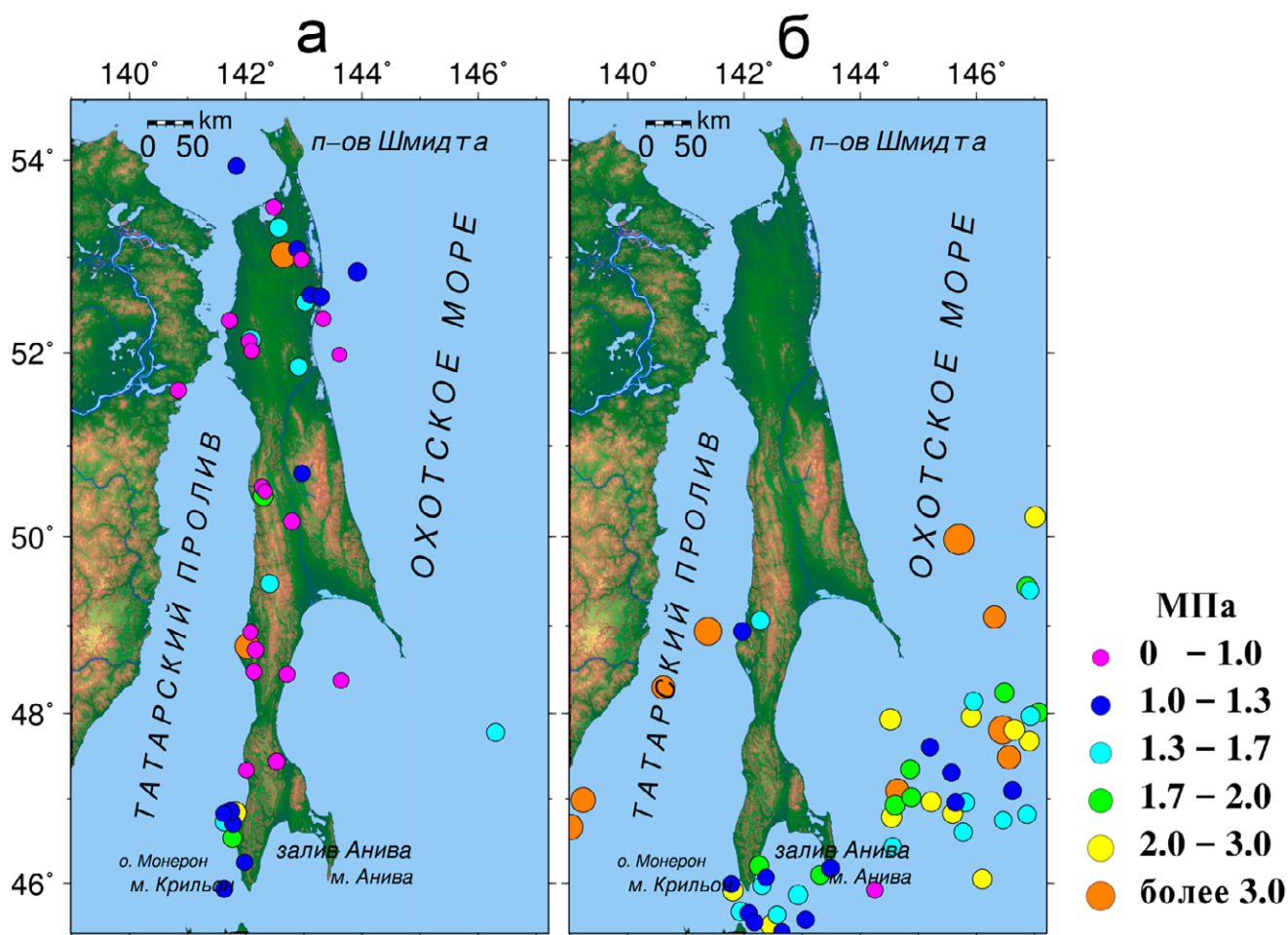


Рис. 5. Эпизентральное положение землетрясений, для которых определены значения сброшенных напряжений и других ДП: а – с глубиной гипоцентров до 60 км, б – с глубиной гипоцентров более 60 км. Радиус круга – значка землетрясения пропорционален величине магнитуды, а цвет указывает величину сброса напряжения МПа. В легенде указаны значения сброшенных напряжений, рассчитанные для модели МКШ.

Fig. 5. The epicentral position of earthquakes for which the values of the stress drop and other DP were determined: a, with a depth of hypocenters up to 60 km; б, with a depth of hypocenters more than 60 km. The radius of the earthquake circle icon is proportional to the magnitude, and the color indicates the magnitude of the stress drop, MPa. The legend shows the values of the stress drop calculated for the Madariagi–Kaneko–Shearer model.

ющим ему значением сейсмического момента M_0 , построим распределение по площади средневзвешенных по объему сброшенных напряжений. Расчеты проведены для ячеек размером $1 \times 1^\circ$, при этом сдвиг также задавался в 1° . Для отображения результатов использовалась программа *nearneighbor* пакета GMT (The Generic Mapping Tools; <https://www.generic-mapping-tools.org/>), в которой реализован алгоритм ближайшего соседа для присвоения среднего значения каждому узлу, который имеет одну или несколько точек в пределах заданного радиуса от узла. В этом программном пакете узел считается центром эллиптической (круговой) зоны, на которую распространяется вычисленное среднее значение. На рис. 6 показано площадное распределение логарифмических значений средневзвешенных сброшенных напряжений по территории для событий на-

ших двух выборок: с глубиной гипоцентров до 60 км и более 60 км. Номер на рисунке соответствует номеру строки в табл. 1, где приведены координаты ячейки, значение средневзвешенного сброшенного напряжения и количество событий, по которым это сброшенное напряжение определено.

По рис. 6 а видно, что для неглубоких землетрясений зоны с наибольшими значениями средневзвешенных сброшенных напряжений расположены в районе Пояска ($\sim 48^\circ$ с.ш.) и на широте г. Ноглики ($\sim 52^\circ$ с.ш.). На юге Сахалина в районе около Западно-Сахалинской разломной зоны, где сейсмическая активность максимальна (выше только на Курильских о-вах, по данным ежегодников «Землетрясения России»; <http://www.gsras.ru/zr/contents.html>), значения средневзвешенных сброшенных напряжений менее 3 МПа. Наиболее

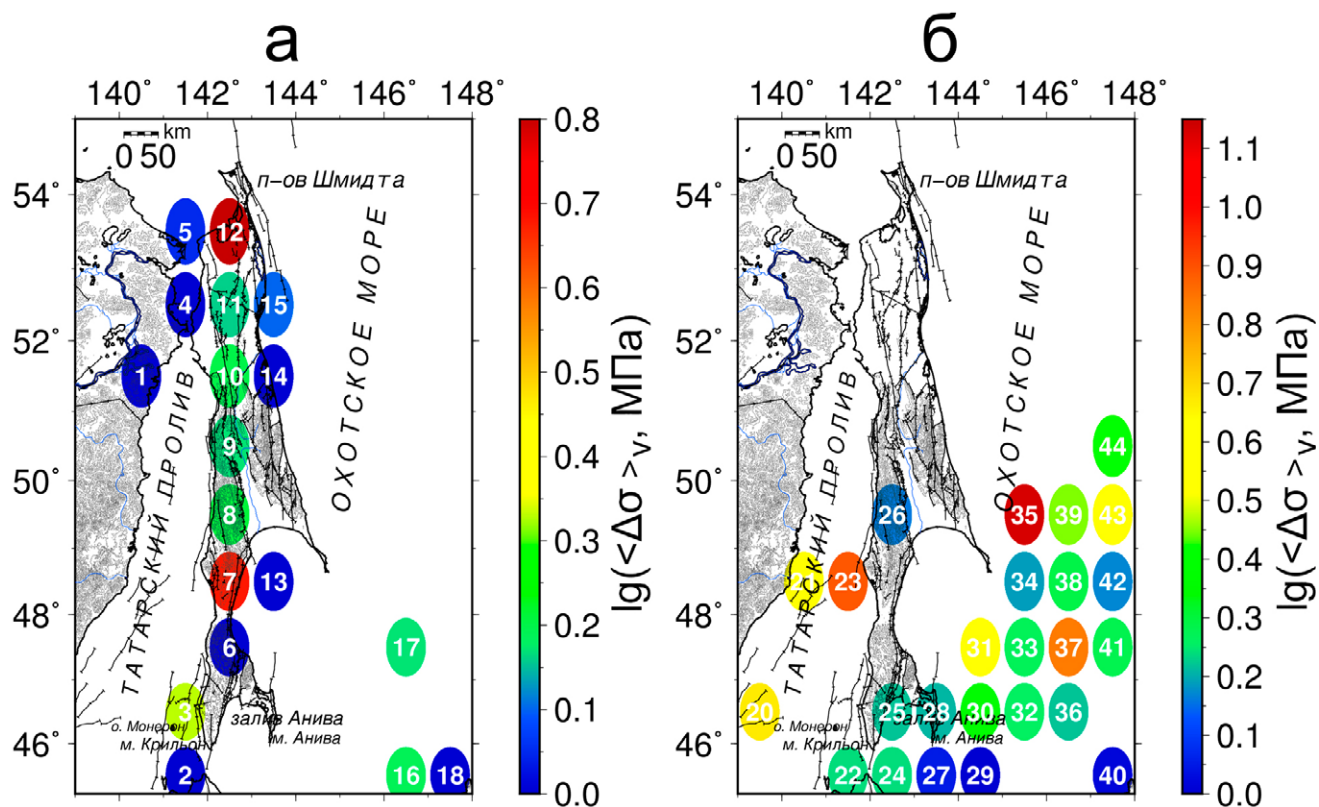


Рис. 6. Распределение логарифмических значений средневзвешенных сброшенных напряжений по площади о. Сахалин и окружающих морей: (а) очаги землетрясений находятся на глубине до 60 км, (б) на глубине более 60 км. Номер в эллипсе соответствует номеру записи в табл. 1. Цвет ячейки соответствует логарифму величины усредненных сброшенных напряжений (логарифмический масштаб позволяет более контрастно выделить ячейки с минимальным значением сброшенных напряжений).

Fig. 6. Distribution of the logarithmic values of weighted average stress drop over the area of Sakhalin Island and surrounding seas: (a), earthquake sources at depths up to 60 km; (б), earthquake sources at depths of more than 60 km. The number in the ellipse corresponds to the number of the entry in Table 1. The color of the ellipse corresponds to the logarithmic value of the averaged stress drop (the logarithmic scale promotes a clearer differentiation of ellipses with a minimum value of the stress drop).

Таблица 1. Рассчитанные значения средневзвешенных сброшенных напряжений

Table 1. Calculated values of weighted average stress drop

№	φ, °N	λ, °E	$\langle \Delta\sigma \rangle_v$ МПа	Σn_i
<i>Глубина < 60 км</i>				
1	51.5	140.5	0.9	1
2	45.5	141.5	1.0	2
3	46.5	141.5	2.1	8
4	52.5	141.5	0.8	1
5	53.5	141.5	1.1	1
6	47.5	142.5	0.9	2
7	48.5	142.5	4.8	5
8	49.5	142.5	1.6	1
9	50.5	142.5	1.5	5
10	51.5	142.5	1.6	1
11	52.5	142.5	1.5	4
12	53.5	142.5	6.6	4
13	48.5	143.5	0.8	1
14	51.5	143.5	0.7	1
15	52.5	143.5	1.3	5
16	45.5	146.5	1.6	1
17	47.5	146.5	1.5	1
18	45.5	147.5	0.9	2
<i>Глубина > 60 км</i>				
19	47.5	138.5	1.9	1
20	46.5	139.5	4.7	2
21	48.5	140.5	3.6	1
22	45.5	141.5	1.8	3
23	48.5	141.5	7.8	2
24	45.5	142.5	1.7	7
25	46.5	142.5	1.7	2
26	49.5	142.5	1.5	1
27	45.5	143.5	1.1	1
28	46.5	143.5	1.6	2
29	45.5	144.5	1.0	1
30	46.5	144.5	2.3	3
31	47.5	144.5	3.8	4
32	46.5	145.5	1.8	5
33	47.5	145.5	1.9	3
34	48.5	145.5	1.5	1
35	49.5	145.5	13.5	1
36	46.5	146.5	1.7	3
37	47.5	146.5	7.0	6
38	48.5	146.5	1.9	1
39	49.5	146.5	2.8	3
40	45.5	147.5	1.0	1
41	47.5	147.5	1.9	1
42	48.5	147.5	1.5	3
43	49.5	147.5	4.3	2
44	50.5	147.5	2.6	1

Примечание. φ и λ – широта и долгота узловой точки, $\langle \Delta\sigma \rangle_v$ – средневзвешенное сброшенное напряжение, Σn_i – количество событий в ячейке (см. рис. 6).

Note. φ and λ, latitude and longitude of node point; $\langle \Delta\sigma \rangle_v$ values of weighted average stress drop; Σn_i , the number of events in the ellipse (see Fig. 6).

низкие значения $\langle \Delta\sigma \rangle_v \sim 1.2$ МПа характерны для событий на юге Сахалина около Центрально-Сахалинской разломной зоны и в северной части Татарского пролива. Для глубокофокусных землетрясений в Охотском море выделяются зоны с наиболее высокими значениями $\langle \Delta\sigma \rangle_v$, превышающими 6 МПа. Одна из них расположена на 47° с.ш., 146° в.д.

В работах [26, 27] построены карты-схемы районирования о. Сахалин по типу геодинамической обстановки. Карты составлены на основе обработки полевых материалов по индикаторам напряженного состояния среды и космоснимков с проявлением разломов в рельефе. Выделено три режима: одноосное сжатие, одноосное (горизонтальное) растяжение и трехосное напряженное состояние. Для сопоставления распределения геодинамических обстановок и средневзвешенного сброса напряжений будем использовать оценки, полученные для выборки землетрясений с глубиной гипоцентров до 60 км. На рис. 7 показано расположение зон с различными значениями $\langle \Delta\sigma \rangle_v$ на карте геодинамических обстановок, приведенной в [27].

Одна из двух зон с наибольшим значением сброса усредненных напряжений располагается по месту узкой части острова и охватывает геологические структуры перешейка Поясок. Эта зона попадает на граничащие друг с другом районы с обстановками преобладающего одноосного сжатия (ее северная часть) и преобладающего одноосного растяжения (южная часть). Другая зона с наибольшим значением $\langle \Delta\sigma \rangle_v$, с центром у 53.5° с.ш., охватывает сопредельные районы с обстановками трехосного напряженного состояния и преобладающего одноосного растяжения. Зоны с наименьшим значением $\langle \Delta\sigma \rangle_v$ в южной части о. Сахалин перекрывают сегменты Центрально-Сахалинской разломной зоны, а на севере попадают на Татарский пролив и северо-западное побережье о. Сахалин. Согласно рис. 7, очаги наиболее сильных землетрясений, произошедших на о. Сахалин в XXI в.: Невельского 02.08.2007, $M_w = 6.2$, и Онорского 14.08.2016, $M_w = 5.8$, оказались лежащими внутри зон с небольшими значениями

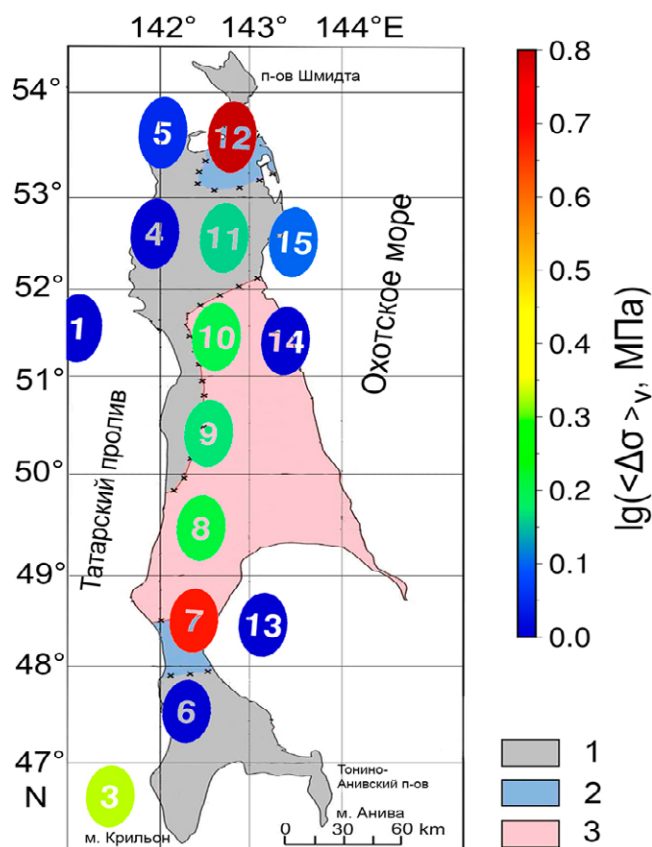


Рис. 7. Схема районирования территории о. Сахалин по типу геодинамической обстановки, согласно [26, 27], и расположение зон с различным средневзвешенным сбросом напряжений в районах с обстановкой трехосного напряженного состояния (1), преобладающего одноосного растяжения (2) и преобладающего одноосного сжатия (3). Цвет эллипса и число внутри эллипса означают то же, что на рис. 6.

Fig. 7. The zoning map of Sakhalin Island based on the type of geodynamic regime, according to [26, 27], and the location of zones with different weighted average stress drop in areas with modes: areas with triaxial stress (1), areas with predominant uniaxial tension (2), and areas with predominant uniaxial compression (3). The color of the ellipse and the number inside the ellipse mean the same as in Fig. 6.

ями средневзвешенных сброшенных напряжений, $\langle \Delta \sigma \rangle_v \sim 3$ МПа, по сравнению с максимумами в «красных зонах». Тем не менее значения $\langle \Delta \sigma \rangle_v$ для этих двух «зеленых» зон примерно втрое больше, чем для зон с минимальными средневзвешенными напряжениями.

В зонах с геодинамическими обстановками преобладающего одноосного сжатия и трехосного напряженного состояния, занимающих наибольшую площадь о. Сахалин (рис. 7), лежат очаги землетрясений с разными типами подвижек (или, другими словами, с разными фокальными механизмами землетрясений). Представляет интерес, наряду с площадным распределением $\langle \Delta \sigma \rangle_v$, сопоставить средневзвешенные сброшенные напряжения для выборок событий с одинаковыми типами подвижек. Для этого также можно использовать информацию из каталогов СМТ, содержащих данные об углах падения осей сжатия Ppl и растяжения Tpl . По значениям углов падения (углов между этими осями и горизонтальной плоскостью) можно определить тип подвижки [24, 25]. В табл. 2 представлено количество очагов с разными типами подвижек для рассматриваемой выборки в 110 землетрясений из каталога СМТ. Также приведены диапазоны значений углов Ppl и Tpl , по которым определялся тип подвижки каждого очага. Согласно табл. 2, среди очагов землетрясений на глубинах до 60 км преобладают взбросы (45 %) и взбросо-сдвиги (10 %). Этот результат согласуется со схемой районирования

Таблица 2. Распределение землетрясений в зависимости от типа подвижки в очаге

Table 2. Distribution of earthquakes according to the type of focal shift

Параметр	Тип подвижки (фокальный механизм)					
	Взброс	Сброс	Горизонтальный сдвиг	Взбросо-сдвиг	Сбросо-сдвиг	Взрез
Угол падения оси Р	$Ppl < 30^\circ$	$Ppl > 60^\circ$	$Ppl < 30^\circ$	$Ppl < 30^\circ$	$30 \leq Ppl \leq 60$	$30 \leq Ppl \leq 60$
Угол падения оси Т	$Tpl > 60^\circ$	$Tpl < 30^\circ$	$Tpl < 30^\circ$	$30 \leq Tpl \leq 60$	$Tpl < 30^\circ$	$30 \leq Tpl \leq 60$
Все события 110 (100)	50 (45)	—	8 (7)	25 (23)	8 (7)	19 (17)
Глубина < 60 км 48 (100)	38 (79)	—	2 (4)	5 (10)	1 (2)	2 (4)
Глубина > 60 км 62 (100)	12 (19)	—	6 (10)	20 (32)	7 (11)	17 (27)

Примечание. В скобках указано процентное соотношение количества землетрясений с разным типом подвижки в очаге.
Note. The percentage of earthquakes with different types of focal shift is indicated in parentheses.

территории о. Сахалин по типу геодинамической обстановки (рис. 7), составленной в [26, 27] на основе геологических индикаторов напряженного состояния среды. На глубинах более 60 км наибольшая доля приходится на взбросо-сдвиги (32 %) и взрезы (27 %).

Средневзвешенные значения сброшенных напряжений для разных типов подвижек рассчитывались по формуле (7) с суммированием по выборкам однотипных землетрясений, раздельно для глубин гипоцентров менее и более 60 км. Результат расчетов показан на рис. 8.

Для очагов, лежащих на глубинах до 60 км, наибольшие значения средневзвешенных сброшенных напряжений свойственны подвижкам типа «горизонтальный сдвиг», а наименьшие – сбросо-сдвигам и взбросо-сдвигам (рис. 8 а). Поскольку максимальное и минимальное значения $\langle \Delta\sigma \rangle_v$ различаются в ~6 раз, этот результат значим, несмотря на небольшую статистику событий. На глубинах более 60 км средневзвешенное значение сброшенных напряжений оказалось наибольшим для очагов типа взброс, а наименьшим – для типа горизонтальный сдвиг, причем различие также шестикратное. На этих глубинах для очагов с подвижками типа взрез и сбросо-сдвиг значения $\langle \Delta\sigma \rangle_v$ намного больше минимального.

С помощью выражения (3) проведены оценки приведенной сейсмической энергии для 48 землетрясений, которые произошли на глубинах до 60 км. Значения сброшенных напряжений взяты из табл. 1. Для параметров среды приняты следующие характерные значения: $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$, согласно [28]; $V_s = 430 \text{ м/с}$ [29, 30].

Для землетрясений с глубинами гипоцентров более 60 км оценки e_{PR} не проводились из-за значительного различия плотности и скорости упругих волн на разных расстояниях от наклонной сейсмофокальной зоны. На рис. 9 показана зависимость приведенной сейсмической энергии от моментной магнитуды землетрясений с очагами на глубинах до 60 км. Диапазон изменения e_{PR} составляет от 10^{-5} до 10^{-3} , что соответствует данным для «нормальных» тектонических землетрясений в других регионах [11, 16, 31]. Полученные значения e_{PR} в этом диапазоне согласуются также с представлениями об излучении сейсмической энергии при динамических разрывах [16].

Стоит отметить, что из выражений (1), (3), (6) и формулы Канамори (4) вытекает наличие линейной регрессии между значениями приведенной сейсмической энергии и моментной магнитуды. Рис. 9 показывает, что во всем диапазоне магнитуд $4.7 < M_w < 7.0$ разброс точек $\lg e_{PR}$ незначительный, а коэффициент

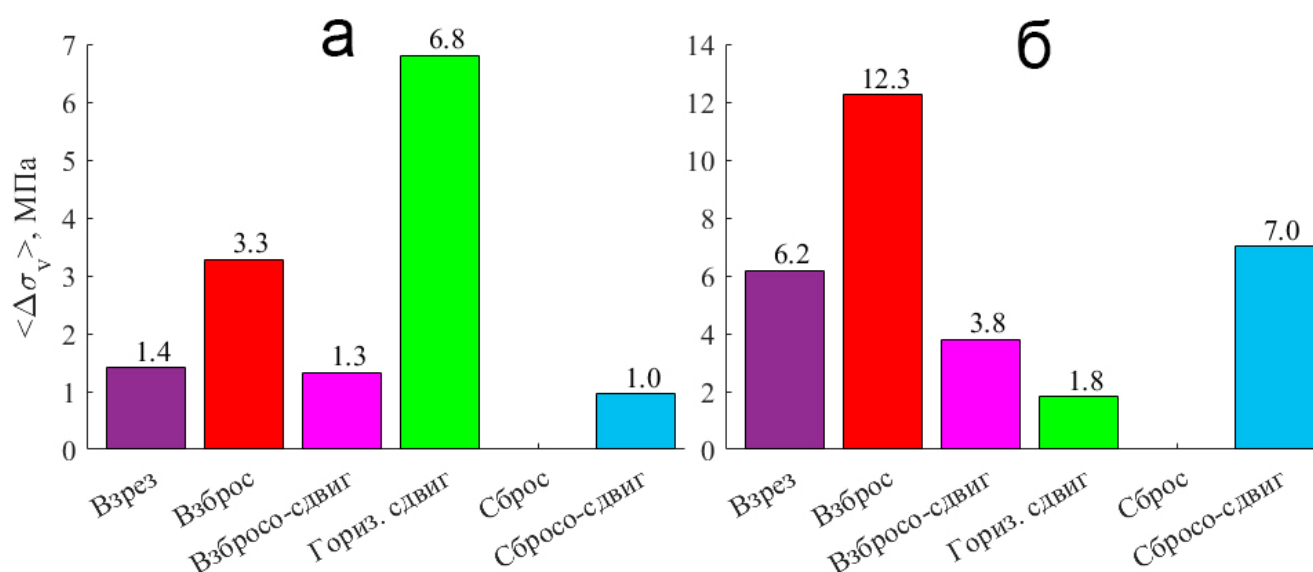


Рис. 8. Средневзвешенные сброшенные напряжения для землетрясений с разными типами очаговых подвижек: (а) очаги на глубине 60 км, (б) очаги на глубине более 60 км.

Fig. 8. Weighted average stress drop for earthquakes with different types of focal shift: (a) source depth up to 60 km; (b) source depth of more than 60 km.

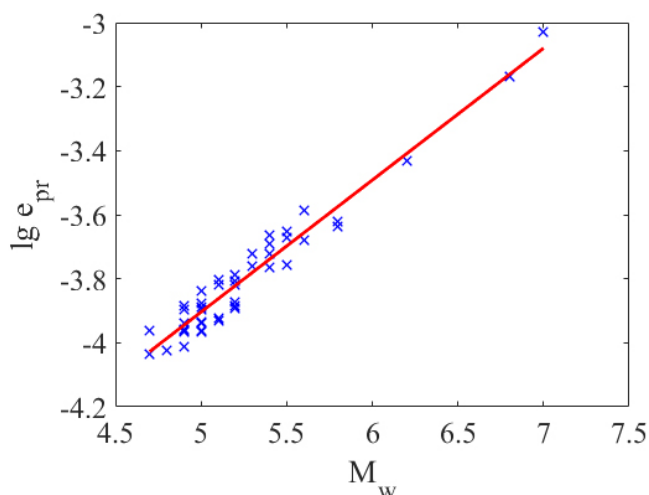


Рис. 9. Зависимость приведенной сейсмической энергии от магнитуды землетрясения для событий с глубиной гипоцентров до 60 км. Уравнение регрессии (красная линия) $\lg e_{pr} = 0.41M_w - 5.96$.

Fig. 9. Dependence of the reduced seismic energy on the magnitude of the earthquake for the events with a depth of hypocenters up to 60 km. The regression equation (red line) $\lg e_{pr} = 0.41M_w - 5.96$.

детерминации R^2 [32] составляет 0.94, что демонстрирует хорошую функциональную зависимость между переменными [33]. Согласно аргументации [16], необходимым условием геомеханического самоподобия очагов является отсутствие статистически значимой взаимосвязи между приведенной сейсмической энергией и скалярным сейсмическим моментом (или моментной магнитудой). Таким образом, для землетрясений с глубиной гипоцентров до 60 км, произошедших на о. Сахалин и прилегающей акватории Охотского и Японского морей, подобие очагов не реализовано. Этот результат аналогичен отмеченному в [11] по данным о динамических параметрах очагов слабых ($M_w < 3.6$) землетрясений в Северном Тянь-Шане. Таким образом, для нескольких регионов установлено, что между усредненными величинами скалярного сейсмического момента сброшенных напряжений и приведенной сейсмической энергии существует монотонно растущая зависимость.

Заключение

С использованием феноменологического подхода, опирающегося на наличие регрессионной зависимости радиуса очага от скалярно-

го сейсмического момента M_0 (или моментной магнитуды M_w), получены значения динамических параметров для 110 землетрясений на Сахалине и окружающих акваториях, произошедших в 1978–2024 гг. В качестве исходных данных использована информация из каталога СМТ о скалярном сейсмическом моменте для очагов этих событий. В результате значительно увеличен объем данных по сброшенным напряжениям и приведенной сейсмической энергии для землетрясений в Сахалинском регионе, по сравнению с каталогом динамических параметров землетрясений в северо-западной части Тихого океана за 1969–1996 [8], где содержится только 8 записей для Сахалина. Используемый подход опирается на концепцию о взаимосвязи $r = f(M_w)$, что соответствует узкому диапазону значений скорости разрыва $V_R \sim (0.75–0.9) V_S$. Вместе с тем наблюдались случаи, когда $V_R \sim V_S$ или больше V_S , а также случаи медленных землетрясений с $V_R \ll V_S$. Это ограничивает область применения данного феноменологического подхода. Для картирования распределения сброшенных напряжений и сравнения с геодинамическими обстановками предложено ввести средневзвешенные значения сброшенных напряжений с весовыми коэффициентами, пропорциональными объему очага. Такие значения для очагов с глубинами до 60 км находятся в пределах 0.7–6.8 МПа. Выделены зоны с наименьшими и наибольшими значениями средневзвешенных сброшенных напряжений. В этих же зонах достигается, соответственно, минимум и максимум приведенной сейсмической энергии. Отмечено, что для очагов землетрясений, лежащих на глубинах до 60 км, выполняется линейная регрессия между величинами приведенной сейсмической энергии и моментной магнитуды. Средневзвешенное значение сброшенных напряжений для очагов на этих глубинах с типом подвижки «горизонтальный сдвиг» составляет 6.8 МПа, что заметно больше, чем для других типов. А на глубинах более 60 км наибольшее значение $\langle \Delta\sigma \rangle_v = 12.3$ МПа оказалось у очагов с подвижкой «взброс».

Список литературы

1. Завьялов А.Д. **2006.** *Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы, методика, реализация.* М.: Наука, 242 с.
2. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. **2012.** The current state of art in earthquake prediction, typical precursors, and experience in earthquake forecasting at Sakhalin Island and surrounding areas. In: *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*, Ch. 5, p. 43–78. <https://doi.org/10.5772/28689>
3. Тараканов Р.З., Тихонов И.Н. **2011.** Сахалинская сейсмология: развитие и некоторые результаты. *Вестник ДВО РАН*, 6: 34–42.
4. Тихонов И.Н., Михайлов В.И., Малышев А.И. **2017.** Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предвещающих сильные толчки, с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 5–14. EDN: XWRJZN
5. Дружин Г.И., Марапулец Ю.В., Чернева Н.В., Исаев А.Ю., Солодчук А.А. **2017.** Акустические и электромагнитные излучения перед землетрясением на Камчатке. *Доклады АН*, 472(5): 584–589. EDN: BIRGXD
6. Закупин А.С., Богинская Н.В. **2022.** Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на примере сильнейших землетрясений XXI столетия. *Литосфера*, 22(6): 872–881. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-872-881>
7. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Descherevskii, Lander A.V., Morozova Yu.V., Buss Yu.Yu., Vlasov Yu.A. **2020.** Stress-strain state monitoring of the geological medium based on the multi-instrumental measurements in boreholes: Experience of research at the Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic testing site (Kamchatka, Russia). *Pure Applied Geophysics*, 177(1): 397–419. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02311-3>
8. Буримская Р.Н. **2001.** Спектральный состав излучения и очаговые параметры землетрясений северо-западной части Тихого океана за 1969–1996 годы. В кн.: *Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана.* Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, т. 1, с. 48–67.
9. Brune J.N. **1970.** Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 75(26): 4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
10. Brune J.N. **1971.** Corrections. *J. of Geophysical Research*, 76: 5002.
11. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. **2020.** О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии. *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 393–416. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416.417-446>
12. Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. **2014.** *Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин.* Владивосток: Дальнаука, 251 с.
13. Татаурова А.А. **2015.** Поля напряжений и деформаций по данным механизмов коровых землетрясений о. Сахалин. *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*, 3(27): 93–101.
14. Scholz C.H. **2002.** *The mechanics of earthquakes and faulting.* Cambridge: Cambridge University Press, 496 p.
15. Madariaga R. **2011.** Earthquake scaling laws. In: R.A. Meyers (ed.) *Extreme environmental events: Complexity in forecasting and early warning.* Springer, 364–383. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6_22
16. Кочарян Г.Г. **2016.** *Геомеханика разломов.* Российская академия наук, Институт динамики геосфер, Российский научный фонд. М.: ГЕОС, 424 с.
17. Ризниченко Ю.В. **1985.** *Проблемы сейсмологии: Избранные труды.* М.: Наука, 408 с.
18. Kanamori H. **1977.** The energy release in great earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 82(20): 2981–2987.
19. Ключевский А.В., Демьянович В.М. **2002.** Динамические параметры очагов землетрясений Байкальской сейсмической зоны. *Физика Земли*, 2: 55–66
20. Madariaga R. **1979.** On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity. *J. of Geophysical Research*, 84: 2243–2250. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02243>
21. Kanamori H., Brodsky E.E. **2004.** The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*. 67: 1429–1496.
22. Kaneko Y, Shearer P.M. **2014.** Seismic source spectra and estimated stress drop derived from cohesive-zone models of circular subshear rupture. *Geophys. J. Int.* 197: 1002–1015. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu030>
23. Zelenin E.A, Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. **2022.** The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Science Data*, 14: 4489–4503.
24. Юнга С. Л. **1990.** *Методы и результаты изучения сейсмостектонических деформаций.* М.: Наука, 190 с.
25. Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Кузиков С.И. **2020.** *Вычислительные технологии в сейсмологических исследованиях (на примере KNET, Северный Тянь-Шань).* Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 358 с.
26. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. **2017.** Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(1): 181–202. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
27. Сим Л.А., Каменев П.А., Богомолов Л.М. **2020.** Новые данные о новейшем напряженном состоянии земной коры острова Сахалин (по структурно-

- геоморфологическим индикаторам тектонических напряжений). *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 372–384. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383>
28. Тихомиров В.М. **1970**. *Плотность горных пород и геологическое картирование в условиях Сахалина*. М.: Наука, 111 с.
 29. Патрикеев В.Н., Ломтев В.Л. **2016**. Разломы северного Сахалина: особенности строения и сейсмическая опасность. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*, 3: 44–58.
 30. Соловьев В.Н., Тихонов И.Н., Кожурин А.И. **2014**. Уточнение фоновой сейсмичности на участке изысканий «Сахалинская ГРЭС-2» (о. Сахалин). *Вопросы инженерной сейсмологии*, 41(2): 60–76.
 31. Добрынина А.А. **2009**. Очаговые параметры землетрясений Байкальской рифтовой зоны. *Физика Земли*, 12: 60–75.
 32. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. **2001**. *Прикладная статистика. Основы эконометрики*: в 2 т. М.: Юнити-Дана. 1088 с.
 33. Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. **2004**. *Эконометрика. Начальный курс*. М.: Дело. 576 с.
- ## References
1. Zavyalov A.D. **2006**. [Medium-term earthquake forecast. *Fundamentals, methodology, implementation*]. Moscow: Nauka, 242 p. (In Russ.).
 2. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. **2012**. The current state of art in earthquake prediction, typical precursors, and experience in earthquake forecasting at Sakhalin Island and surrounding areas. In: *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*, Ch. 5, p. 43–78. <https://doi.org/10.5772/28689>
 3. Tarakanov R.Z., Tikhonov I.N. **2011**. [Sakhalin seismology: development and some results]. *Vestnik of the FEB RAS*, 6: 34–42. (In Russ.).
 4. Tikhonov I.N., Mikhaylov V.I., Malyshev A.I. **2017**. Modeling the Southern Sakhalin earthquake sequences preceding strong shocks for short-term prediction of their origin time. *Russian J. of Pacific Geology*, 11(1): 1–10. <https://doi.org/10.1134/s1819714017010092>
 5. Druzhin G.I., Marapulets Yu.V., Cherneva N.V., Isaev A.A., Solodchuk A.A. **2017**. Acoustic and electromagnetic emissions preceding the earthquake in Kamchatka. *Doklady Earth Sciences*, 472: 215–219. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17020118>
 6. Zakupin A.S., Boginskaya N.V. **2022**. Medium-term earthquake forecasts by the LURR method on the example of the strongest earthquakes of the 21st century. *Lithosphere*, 22(6): 872–881. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-872-881>
 7. Gavrilov V.A., Pantelev I.A., Descherevskii, Lander A.V., Morozova Yu.V., Buss Yu.Yu., Vlasov Yu.A. **2020**. Stressstrain state monitoring of the geological medium based on the multi-instrumental measurements in boreholes: Experience of research at the Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic testing site (Kamchatka, Russia). *Pure Applied Geophysics*, 177(1): 397–419. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02311-3>
 8. Burymskaya R.N. **2001**. [Spectral composition of radiation and the source parameters of earthquake in the northwestern Pacific during 1969–1996]. In: A.I. Ivashchenko (ed.) [Dynamics of source zones and forecast of the strong earthquakes in the Northwestern Pacific]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMG FEB RAS, vol. 1, p. 48–67. (In Russ.).
 9. Brune J.N. **1970**. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 75(26): 4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
 10. Brune J.N. **1971**. Corrections. *J. of Geophysical Research*, 76: 5002.
 11. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. **2020**. On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 417–446. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416.417-446>
 12. Konovalov A.V., Nagornyykh T.V., Safonov D.A. **2014**. [Modern research on the mechanisms of earthquake foci on Sakhalin Island]. Vladivostok: Dal'nauka, 251 p.
 13. Tataurova A.A. **2015**. Stress and strain fields based on data on crustal earthquake mechanisms in Sakhalin Island. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 3(27): 93–101. (In Russ.).
 14. Scholz C.H. **2002**. *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 496 p.
 15. Madariaga R. **2011**. Earthquake scaling laws. In: R.A. Meyers (ed.) *Extreme environmental events: Complexity in forecasting and early warning*. Springer, 364–383. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6_22
 16. Kocharyan G.G. **2016**. *Geomechanics of faults*. Moscow: GEOS, 424 p. (In Russ.).
 17. Riznichenko Yu.V. **1985**. [Problems of seismology: Selected works]. Moscow: Nauka, 408 p. (In Russ.).
 18. Kanamori H. **1977**. The energy release in great earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 82(20): 2981–2987.
 19. Klyuchevskii A.V., Demjanovich V.M. **2002**. Source amplitude parameters of strong earthquakes in the Baikal seismic zone. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 38(2): 139–148.
 20. Madariaga R. **1979**. On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity. *J. of Geophysical Research*, 84: 2243–2250. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02243>
 21. Kanamori H., Brodsky E.E. **2004**. The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*. 67: 1429–1496.

22. Kaneko Y, Shearer P.M. **2014**. Seismic source spectra and estimated stress drop derived from cohesive-zone models of circular subshear rupture. *Geophysical Journal International*, 197: 1002–1015. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu030>.
23. Zelenin E.A, Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. **2022**. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Science Data*, 14: 4489–4503.
24. Yunga S.L. **1990**. [*Methods and results of studying seismic tectonic deformations*]. Moscow: Nauka, 191 p. (In Russ.).
25. Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Kuzikov S.I. **2020**. [*Computational technologies in seismological studies (on the example of KNET, Northern Tian Shan)*] Yu-zhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 358 p. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.30730/978-5-6040621-6-6.2020-2>
26. 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>
27. 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 perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 372–383. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383>
28. Tikhomirov V.M. **1970**. [*Rock density and geological mapping in Sakhalin conditions*]. Moscow: Nauka, 111 p. (In Russ.).
29. Patrikeev V.N., Lomtev V.L. **2016**. Northern Sakhalin faults: structure peculiarities and seismic hazard. *Geology and Mineral Resources of World Ocean*, 3: 44–58. (In Russ.).
30. Soloviev S.L., Tikhonov I.N., Kozhurin A.I. **2014**. Refinement of background seismicity within the site location of the power plant «Sakhalinskaja GRES-2» (Sakhalin Island). *Problems of Engineering Seismology*, 41(2): 60–76. (In Russ.).
31. Dobrynina A.A. **2009**. Source parameters of the earthquakes of the Baikal Rift System. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 45(12): 1093–1109.
32. Ayvaz'an S.A., Mkhitar'an V.S. **2001**. [*Applied statistics. Fundamentals of econometrics*]: in 2 vol. Moscow: Yuniti-Dana, 1088 p. (In Russ.).
33. Magnus YA.R., Katyshev P.K., Peresetskiy A.A. **2004**. [*Econometrics: The initial course*]. Moscow: Delo Publ., 576 p. (In Russ.).

APPENDIX / ПРИЛОЖЕНИЕ

Параметры гипоцентров и динамические параметры очагов землетрясений на Сахалине и прилегающих акваториях Охотского и Японского морей

Hypocenter parameters and dynamic parameters of earthquake sources on Sakhalin and adjacent area of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan

No.	Date	$\varphi, ^\circ\text{N}$	$\lambda, ^\circ\text{E}$	h, km	M_w	$M_0 \cdot 10^{17}, \text{N} \cdot \text{m}$	$r_B \cdot 10^3, \text{m}$	$r_M \cdot 10^3, \text{m}$	$\Delta\sigma, \text{MPa}$	$e_{PR} \cdot 10^{-4}$
1	1978:11:15	47.78	146.30	15.0	5.4	1.76	5.30	3.72	1.49	5.85
2	1979:07:28	49.48	142.41	15.0	5.5	2.47	5.75	4.04	1.63	6.41
3	1980:12:22	48.14	145.95	485.1	5.5	2.33	5.75	4.04	1.54	6.04
4	1981:02:06	48.24	146.48	517.1	5.7	4.82	6.79	4.77	1.94	7.60
5	1982:07:14	45.62	142.57	328.7	5.4	1.80	5.30	3.72	1.53	5.99
6	1982:11:27	50.22	147.01	628.0	6.0	13.40	8.71	6.12	2.56	10.02
7	1983:03:17	51.60	140.84	15.0	5.1	0.48	4.13	2.90	0.86	3.38
8	1984:02:01	49.10	146.31	581.3	6.3	36.00	11.17	7.85	3.26	12.77
9	1984:04:23	47.49	146.56	417.0	6.5	60.10	13.18	9.26	3.31	12.96
10	1984:12:22	50.17	142.79	37.8	5.2	0.68	4.49	3.15	0.94	3.70
11	1985:01:06	45.56	143.06	332.5	5.3	1.02	4.88	3.43	1.11	4.35
12	1985:02:23	47.31	145.57	429.3	5.3	1.14	4.88	3.43	1.24	4.86
13	1985:10:18	46.05	146.10	277.1	5.7	5.00	6.79	4.77	2.01	7.89
14	1987:05:07	46.67	139.01	442.2	6.8	176.00	16.90	11.88	4.59	18.00

No.	Date	$\varphi, ^\circ\text{N}$	$\lambda, ^\circ\text{E}$	h, km	M_w	$M_0 \cdot 10^{17}, \text{N}\cdot\text{m}$	$r_B \cdot 10^3, \text{m}$	$r_M \cdot 10^3, \text{m}$	$\Delta\sigma, \text{MPa}$	$e_{PR} \cdot 10^{-4}$
15	1987:05:18	49.12	147.39	551.7	6.8	170.00	16.90	11.88	4.44	17.39
16	1988:06:26	45.92	144.25	374.0	5.1	0.55	4.13	2.90	0.99	3.88
17	1989:08:29	48.00	147.43	444.3	5.2	0.73	4.49	3.15	1.02	4.00
18	1990:05:12	48.94	141.38	612.5	7.2	818.00	23.55	16.55	7.90	30.95
19	1990:08:20	46.21	142.26	348.0	5.7	4.42	6.79	4.77	1.78	6.97
20	1991:07:05	47.96	145.91	465.2	5.8	7.26	7.38	5.19	2.28	8.93
21	1992:03:27	48.01	147.07	450.6	5.6	3.35	6.25	4.39	1.73	6.77
22	1992:06:16	45.49	142.47	330.4	6.0	11.30	8.71	6.12	2.16	8.45
23	1993:01:24	45.64	142.08	312.3	5.3	0.97	4.88	3.43	1.06	4.15
24	1993:02:09	45.66	141.94	314.4	5.6	2.86	6.25	4.39	1.48	5.78
25	1993:08:30	48.38	143.64	44.9	4.9	0.27	3.50	2.46	0.81	3.16
26	1994:12:13	53.94	141.84	35.3	5.2	0.80	4.49	3.15	1.11	4.37
27	1995:02:18	46.61	145.77	353.0	5.5	1.97	5.75	4.04	1.30	5.11
28	1995:03:10	46.10	143.31	354.8	5.6	3.61	6.25	4.39	1.86	7.30
29	1995:05:27	53.03	142.65	23.6	7.0	432.00	19.95	14.02	6.86	26.87
30	1995:05:28	52.98	142.96	25.8	5.0	0.41	3.80	2.67	0.94	3.67
31	1995:06:13	53.09	142.88	15.0	5.1	0.65	4.13	2.90	1.15	4.52
32	1995:06:13	52.61	143.11	15.0	5.1	0.65	4.13	2.90	1.16	4.53
33	1995:09:30	51.85	142.91	33.0	5.4	1.88	5.30	3.72	1.60	6.25
34	1995:12:18	52.53	143.02	15.0	5.3	1.28	4.88	3.43	1.39	5.46
35	1996:01:08	53.31	142.57	15.0	5.6	2.99	6.25	4.39	1.54	6.05
36	1997:11:28	46.96	145.81	401.0	5.5	2.13	5.75	4.04	1.41	5.52
37	2000:07:10	46.83	145.59	361.3	5.8	6.52	7.38	5.19	2.05	8.02
38	2000:08:04	48.77	142.03	15.0	6.8	192.00	16.90	11.88	5.01	19.64
39	2000:08:10	48.73	142.17	15.0	5.2	0.69	4.49	3.15	0.96	3.77
40	2001:02:26	46.79	144.54	396.4	6.0	14.90	8.71	6.12	2.84	11.14
41	2001:09:01	47.44	142.53	15.0	5.2	0.70	4.49	3.15	0.98	3.85
42	2002:02:09	45.97	142.31	356.3	5.4	1.78	5.30	3.72	1.51	5.92
43	2002:03:07	47.97	146.93	453.8	5.6	2.78	6.25	4.39	1.43	5.62
44	2002:11:05	49.06	142.28	604.0	5.6	2.81	6.25	4.39	1.45	5.68
45	2002:11:17	47.81	146.45	479.8	7.3	1050.00	25.59	17.98	7.90	30.98
46	2003:02:08	48.45	142.71	45.1	5.1	0.49	4.13	2.90	0.88	3.44
47	2003:07:27	46.99	139.23	477.2	6.7	146.00	15.56	10.93	4.89	19.15
48	2004:04:17	46.96	145.64	408.3	5.3	0.99	4.88	3.43	1.07	4.21
49	2004:05:30	47.34	142.01	19.2	4.9	0.27	3.50	2.46	0.80	3.12
50	2004:11:07	47.93	144.52	493.0	6.1	18.10	9.46	6.65	2.69	10.56
51	2005:03:08	52.34	141.72	17.4	5.0	0.37	3.80	2.67	0.85	3.33
52	2005:06:12	52.85	143.92	15.0	5.5	1.94	5.75	4.04	1.28	5.03
53	2006:03:14	48.04	147.46	420.3	5.3	1.26	4.88	3.43	1.37	5.37
54	2006:06:16	46.44	144.56	375.3	5.3	1.28	4.88	3.43	1.39	5.46
55	2006:08:17	46.54	141.77	18.1	5.6	3.68	6.25	4.39	1.90	7.44
56	2006:09:13	46.75	146.46	351.1	5.3	1.22	4.88	3.43	1.33	5.20

No.	Date	$\varphi, ^\circ\text{N}$	$\lambda, ^\circ\text{E}$	h, km	M_w	$M_0 \cdot 10^{17}, \text{N}\cdot\text{m}$	$r_B \cdot 10^3, \text{m}$	$r_M \cdot 10^3, \text{m}$	$\Delta\sigma, \text{MPa}$	$e_{PR} \cdot 10^{-4}$
57	2007:03:28	44.90	146.28	209.6	5.0	0.39	3.80	2.67	0.90	3.52
58	2007:08:02	46.84	141.82	12.0	6.2	23.50	10.28	7.22	2.73	10.69
59	2007:08:02	46.81	141.67	13.4	5.8	5.42	7.38	5.19	1.70	6.67
60	2007:08:02	46.71	141.78	18.2	5.2	0.86	4.49	3.15	1.19	4.68
61	2007:08:02	46.73	141.63	12.0	5.4	1.65	5.30	3.72	1.40	5.49
62	2007:08:14	46.86	141.74	12.0	5.4	1.49	5.30	3.72	1.26	4.95
63	2008:09:18	46.18	143.49	343.8	5.4	1.39	5.30	3.72	1.18	4.62
64	2009:10:26	47.61	145.20	480.2	5.3	1.03	4.88	3.43	1.12	4.39
65	2010:03:16	52.14	142.09	12.0	5.8	5.39	7.38	5.19	1.69	6.63
66	2010:07:09	52.12	142.06	13.1	5.0	0.35	3.80	2.67	0.79	3.11
67	2010:11:02	46.82	146.87	362.4	5.5	1.98	5.75	4.04	1.31	5.13
68	2011:12:09	46.93	144.60	390.0	5.8	5.43	7.38	5.19	1.70	6.68
69	2011:12:12	50.70	142.97	16.4	5.1	0.62	4.13	2.90	1.11	4.37
70	2012:02:07	45.53	142.18	317.8	5.2	0.89	4.49	3.15	1.24	4.87
71	2012:07:09	49.12	147.25	556.0	5.4	1.53	5.30	3.72	1.30	5.09
72	2012:07:29	47.29	138.90	506.9	5.7	4.69	6.79	4.77	1.89	7.40
73	2012:08:14	49.97	145.70	598.2	7.7	4840.00	35.65	25.05	13.47	52.81
74	2012:09:22	45.99	141.78	328.5	5.2	0.74	4.49	3.15	1.03	4.05
75	2012:10:21	53.52	142.48	12.0	5.0	0.37	3.80	2.67	0.86	3.36
76	2013:01:03	45.01	141.73	23.2	4.9	0.24	3.50	2.46	0.71	2.79
77	2013:03:27	45.42	142.65	288.4	5.0	0.47	3.80	2.67	1.07	4.21
78	2013:07:04	46.83	141.62	17.9	5.0	0.47	3.80	2.67	1.07	4.20
79	2013:08:04	46.97	145.22	378.0	5.8	7.19	7.38	5.19	2.26	8.84
80	2013:11:24	52.02	142.10	20.1	4.9	0.28	3.50	2.46	0.81	3.18
81	2013:11:25	45.93	141.63	20.6	5.2	0.82	4.49	3.15	1.14	4.48
82	2014:02:19	52.36	143.33	17.8	4.9	0.33	3.50	2.46	0.96	3.75
83	2014:02:20	46.07	142.38	329.3	5.1	0.66	4.13	2.90	1.18	4.63
84	2014:09:16	45.12	147.06	18.1	5.0	0.35	3.80	2.67	0.81	3.16
85	2015:01:14	48.94	141.97	591.4	5.3	0.98	4.88	3.43	1.07	4.18
86	2015:08:27	45.01	147.39	154.2	5.1	0.58	4.13	2.90	1.05	4.10
87	2016:07:23	47.68	146.91	423.2	5.8	7.11	7.38	5.19	2.23	8.74
88	2016:08:14	50.45	142.30	12.5	5.8	5.58	7.38	5.19	1.75	6.86
89	2016:08:15	50.55	142.28	14.6	4.9	0.29	3.50	2.46	0.85	3.33
90	2016:08:17	50.50	142.33	13.3	4.7	0.17	2.96	2.08	0.80	3.15
91	2016:09:26	45.30	147.26	22.6	4.9	0.32	3.50	2.46	0.94	3.67
92	2017:04:23	46.25	141.98	14.9	5.1	0.62	4.13	2.90	1.11	4.37
93	2017:11:29	45.31	146.34	17.0	5.5	2.36	5.75	4.04	1.56	6.12
94	2018:07:01	47.02	144.88	398.9	5.6	3.66	6.25	4.39	1.89	7.40
95	2018:11:02	47.81	146.65	446.7	6.0	13.90	8.71	6.12	2.65	10.40
96	2019:07:09	47.35	144.86	450.9	5.6	3.30	6.25	4.39	1.70	6.67
97	2020:09:13	48.93	142.08	14.0	4.8	0.18	3.22	2.26	0.69	2.72
98	2020:11:30	48.30	140.61	599.7	6.4	51.50	12.13	8.53	3.63	14.24

No.	Date	$\varphi, ^\circ\text{N}$	$\lambda, ^\circ\text{E}$	h, km	M_w	$M_0 \cdot 10^{17}, \text{N}\cdot\text{m}$	$r_B \cdot 10^3, \text{m}$	$r_M \cdot 10^3, \text{m}$	$\Delta\sigma, \text{MPa}$	$e_{PR} \cdot 10^{-4}$
99	2021:09:03	49.44	146.87	588.0	5.8	5.95	7.38	5.19	1.87	7.32
100	2021:09:12	47.10	146.62	360.8	5.4	1.42	5.30	3.72	1.20	4.72
101	2022:02:05	52.59	143.29	12.6	5.3	1.17	4.88	3.43	1.27	4.99
102	2022:02:08	48.48	142.14	13.1	5.0	0.42	3.80	2.67	0.98	3.82
103	2022:03:24	51.98	143.61	22.0	4.7	0.14	2.96	2.08	0.68	2.65
104	2022:07:02	45.91	141.81	320.0	5.9	8.23	8.02	5.63	2.01	7.89
105	2022:08:10	44.95	141.92	13.2	5.0	0.42	3.80	2.67	0.95	3.74
106	2022:08:10	44.93	141.93	13.9	5.2	0.80	4.49	3.15	1.12	4.38
107	2023:06:17	47.95	147.37	413.8	5.7	4.77	6.79	4.77	1.92	7.52
108	2023:06:23	45.86	142.93	329.4	5.7	3.91	6.79	4.77	1.57	6.17
109	2024:08:10	47.10	144.64	412.5	6.5	83.20	13.18	9.26	4.58	17.95
110	2024:11:05	49.40	146.92	581.0	5.4	1.55	5.30	3.72	1.32	5.15

Примечание. φ, λ – широта и долгота, h – глубина, M_w – моментная магнитуда, M_0 – скалярный сейсмический момент, r_B, r_M – радиусы очагов по моделям Брюна и Мадариаги–Канеко–Ширера соответственно, $\Delta\sigma$ – сброшенные касательные напряжения, e_{PR} – приведенная сейсмическая энергия.

Note. φ and λ , latitude and longitude; h , depth; M_w , moment magnitude; M_0 , scalar seismic moment; r_B and r_M , radii of the sources by the models of Brune and Madariaga–Kaneko–Shearer, respectively; $\Delta\sigma$, shear stress drop; e_{PR} , reduced seismic energy.

Об авторах

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

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

About the Authors

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

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

Поступила 03.06.2025

Принята к публикации 09.07.2025

Received 3 June 2025

Accepted 9 July 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)

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 550.343(571.642)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.256-264><https://www.elibrary.ru/eaazgl>

Прогноз землетрясений методом LURR на Сахалине в режиме реального времени. Результаты мониторинга в 2023–2025 гг. и их оценка в связи с мегаземлетрясением на Камчатке 30.07.2025, *M* 8.8

А. С. Закупин

E-mail: dikii79@mail.ru

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

Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. Представлены результаты продолжающегося исследования сейсмичности Сахалина методом среднесрочного прогноза землетрясений LURR (load-unload response ratio). Результаты очередного этапа включают расчеты параметра LURR по сейсмическим данным с 2023 по 2025 г. (первый этап 2019–2022 гг.) в 36 расчетных областях. Эти области равномерно покрывают остров сеткой с шагом 0.5° по широте и долготе. В течение всего периода ежеквартально анализировалась информация о новых аномалиях в поведении параметра LURR и зонах прогноза. За 2023 – 3 квартал 2024 г. было обнаружено 24 аномалии. С учетом 11 аномалий 2022 г. их общее количество стало 35 за 2 с половиной года. Поскольку сильного землетрясения на Сахалине не произошло, естественно было предположить, что такое количество аномалий могло быть обусловлено неординарным и значимым фактором за пределами Сахалина. Таким фактором мог стать процесс подготовки мегаземлетрясения на Камчатке 30.07.2025, *M* 8.8. Для проверки этого предположения проведены расчеты параметра LURR в эпицентре землетрясения 30.07.2025, а также вдоль зоны субдукции в направлении распространения облака афтершоков. Главным результатом стало обнаружение ретроспективного предвестника за несколько месяцев до землетрясения. Кроме того, в результате анализа показано, что периоды аномальной активности LURR в период с 2022 по 2024 г. для данного района Камчатки и Сахалина совпадают.

Ключевые слова: сейсмичность, сейсмические события, мониторинг, метод LURR, аномалия параметра LURR, предвестник землетрясения

Real-time LURR earthquake forecast in Sakhalin. Results of the monitoring in 2023–2025 and their assessment in connection with the megathrust earthquake in Kamchatka on July 30, 2025, *M* 8.8

Aleksander S. Zakupin

E-mail: dikii79@mail.ru

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

Sakhalin Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The results of the ongoing study on the seismicity of Sakhalin using the LURR method (Load-Unload Response Ratio) of the medium-term earthquake forecast are presented. The results of the recent stage of the study included calculations of the LURR parameter based on seismic data from 2023 to 2025 (the first stage, from 2019 to 2022) in 36 calculated areas. These areas evenly cover the island with a grid with a step of 0.5° in latitude and longitude. During the entire period, the information about new LURR anomalies and forecast zones was analyzed on a quarterly basis. From 2023 to 3Q 2024, 24 LURR anomalies were detected. Taking into account 11 anomalies registered in 2022,

a total of 35 anomalies were identified in 2.5 years. Since no major earthquake occurred in Sakhalin, it was reasonable to assume that such a large number of anomalies could be due to unusual and significant factors outside Sakhalin. A hypothesis has been proposed regarding the possible impact of the megathrust earthquake in Kamchatka on July 30, 2025 ($M = 8.8$), on the LURR parameter in Sakhalin. To test it, we calculated the LURR parameter at the epicenter of the earthquake on July 30, 2025, as well as along the subduction zone in the direction of the aftershock cloud. It was shown that the hypothesis is valid due to the presence of the precursor several months prior to the event. Moreover, the analysis revealed that the LURR anomalies in the period from 2022 to 2024 coincide for the part of Kamchatka, where the earthquake occurred, and Sakhalin.

Keywords: seismicity, seismic events, monitoring, LURR method, LURR anomalies, precursor of the earthquake

Для цитирования: Закупин А.С. Прогноз землетрясений методом LURR на Сахалине в режиме реального времени. Результаты мониторинга в 2023–2025 гг. и их оценка в связи с мегаземлетрясением на Камчатке 30.07.2025, M 8.8. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 3, с. 256–264. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.3.256-264>; <https://www.elibrary.ru/eaazgl>

For citation: Zakupin A.S. Real-time LURR earthquake forecast in Sakhalin. Results of the monitoring in 2023–2025 and their assessment in connection with the megathrust earthquake in Kamchatka on July 30, 2025, M 8.8. *Geosistemy perehodykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 3, pp. 256–264. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.3.256-264>

Финансирование и благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН № 075-00604-25) 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/>; <http://www.gsras.ru/unu/>). Автор благодарит уважаемых рецензентов за детальный анализ работы и полезные замечания.

Funding and Acknowledgements

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

Введение

Исследования сейсмичности Сахалина методом среднесрочного прогноза землетрясений методом LURR (load-unload response ratio) [5–7] в реальном времени для о. Сахалин проводятся совместно Институтом морской геологии и геофизики Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН) и Сахалинским филиалом Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) в рамках работы Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (СФ РЭС). Практика проверки методов прогноза опытным путем известна и впервые была применена в ходе продолжительного эксперимента (в течение 20 лет) в Институте теории прогноза землетрясений (ИТПЗ РАН) при проверке методов M_8 и M_{Sc} [4]. Основная цель нашего эксперимента, начатого в 2022 г., – это апробация

работы с данными в режиме реального времени (получение и анализ данных раз в квартал) и проверка качества решения процедурных вопросов по ведению прогноза от стадии утверждения до стадии завершения. Результаты первого этапа, полученные из анализа данных за период 2019–2021 гг., а также за 2022 г., были опубликованы в [3]. Этот промежуточный результат показал хорошую эффективность метода LURR: из 4 официально выданных прогнозов 3 были успешно реализованы, а четвертый на момент публикации являлся действующим (до середины 2024 г.). В 2023–2025 гг. предстояло дать оценку действующему прогнозу, а также выявлять и фиксировать новые зоны для будущих землетрясений.

При этом нельзя не учитывать, что напряженно-деформированное состояние (и, соответственно, отражающие его аномалии LURR) сахалинских линеаментов может быть связано со структурами, которые находятся в коллизии на всем протяжении границ Охотской плиты.

В 2025 г. у юго-восточного побережья Камчатки произошло землетрясение планетарного уровня (30.07.2025, $M = 8.8$). Это землетрясение стало девятым землетрясением с $M > 8$ в XXI столетии, а в статусе сильнейших входит в десятку крупнейших сейсмических событий, произошедших в мире в течение последних 125 лет. Землетрясению предшествовало около 50 форшоков с $M > 5$, включая землетрясение 20.07.2025 ($M = 7.7$). Продолжают регистрироваться множественные афтершоки, в том числе $M > 6$. Землетрясение произошло в зоне субдукции на границе Тихоокеанской и Охотской плит и для Сахалина имеет статус близкого регионального землетрясения (по расстоянию). Кроме того, Сахалин находится на стыке Охотской и Амурской плит, и если считать в любом приближении тектонические плиты целыми и жесткими объектами, то критические нагрузки на одном фланге должны каким-то образом отражаться на противоположном – где также происходит коллизия плит. Поэтому представляет интерес оценить результаты нашего локального мониторинга во взаимосвязи с периодом подготовки этого значимого сейсмического события.

Методика эксперимента

Эксперимент предполагает получение и анализ данных в оперативном (обновление раз в квартал, задержка не более месяца от текущего времени) режиме. В ходе второго этапа данный регламент соблюдался в полной мере, что отражено в протоколах СФ РЭС.

Для анализа сейсмичности Сахалина, а также юго-восточной зоны около п-ова Камчатка (где произошло землетрясение 30.07.2025) методом LURR используется оперативный каталог из базы данных Регионального информационно-обрабатывающего центра (РИОЦ) «Южно-Сахалинск», входящего в структуру СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Методика расчетов параметра LURR, включая принципы определения расчетных зон, выявления аномалий и определения зон прогноза полностью соответствует той, которую тестировали в масштабном исследова-

нии сейсмичности Сахалина в период 1997–2019 гг. [1] и которая применялась с начала эксперимента (с 2019 г.). Основные принципы методики: достаточно плотное покрытие территории расчетными областями (это окружности радиусом в 1° , которые расположены через 0.5° ; остров, таким образом, поделен на 36 областей); фиксированные параметры математической обработки (скользящее окно в 360 дней); рабочая выборка землетрясений в области расчета в диапазоне магнитуд от 3.3 до 5); период ожидания 2 года. Определены и принципы выделения аномалий, в частности один из главных – это порог (равен 3), при превышении которого параметр выходит в область аномальных значений. Для расчета параметра LURR в районе Камчатки скользящее окно сглаживания выбиралось в два раза меньше – 180 дней. В работе [2] этот параметр определен эмпирически (на примере Южных Курильских островов) и может применяться в зонах субдукции с большим количеством землетрясений $M > 4$.

Результаты

К 2023 г., как уже было сказано ранее, в наличии имелся официально утвержденный прогноз, основанный на 10 аномалиях, которые появились с марта по август 2022 г. в северной части острова. Тогда решением Совета (протокол СФ РЭС № 3 от 14.10.2022 г.) до мая 2024 г. был объявлен среднесрочный прогноз сейсмического события с магнитудой $M \geq 5.0$ (± 0.1) для северной части о. Сахалин в границах $52.0\text{--}54.5^\circ$ с.ш., $141.5\text{--}144^\circ$ в.д.

В феврале 2023 г. аномалии параметра LURR были выявлены в пяти расчетных областях в центральной части острова, в результате чего протоколом СФ РЭС от 20.04.2023 г. был объявлен очередной (пятый от начала исследования), среднесрочный прогноз землетрясения с $M = 5\text{--}6$ для района в координатах $48\text{--}49.5^\circ$ с.ш. и $141.5\text{--}143^\circ$ в.д. до апреля 2025 г. Однако уже в мае, а затем в августе в ряде расчетных областей появились новые аномалии. Впоследствии остров «накрыло» серией аномалий (рис. 1), причем они появлялись

с такой частотой, что было принято решение больше прогнозов не оформлять. С учетом сложившейся обстановки также было принято решение упомянутый прогноз сейсмического события на севере с магнитудой $M \geq 5.0 (\pm 0.1)$ продлить до конца 2024 г.

Несмотря на то что в четвертом квартале 2024 г. и в первых двух кварталах 2025 anomalies прекратились, период с марта 2022 по сентябрь 2024 г. требует внимательного рассмотрения. Ситуация, когда anomalies волнами накрывают части острова в короткие

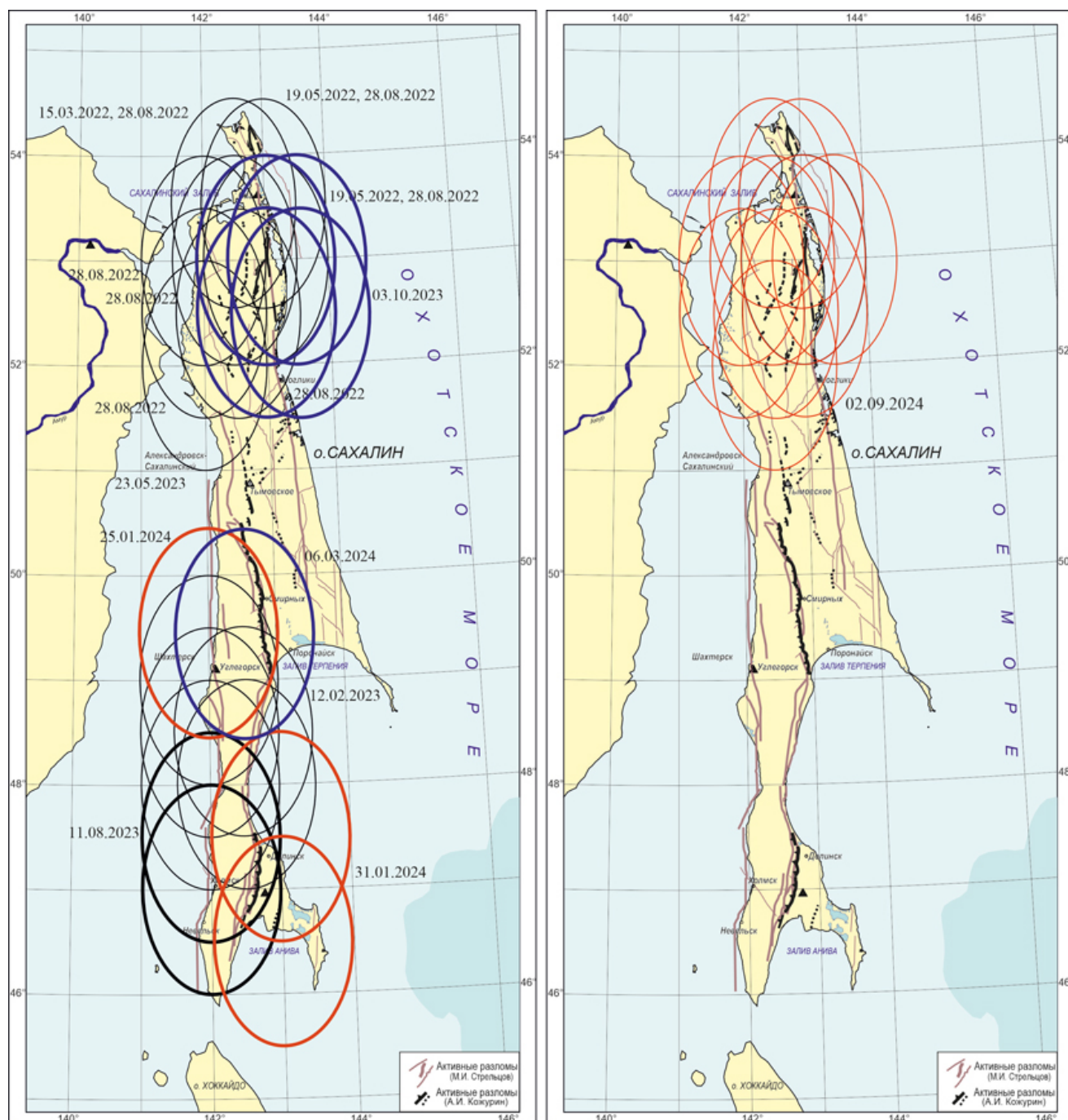


Рис. 1. Динамика распространения аномалий параметра LURR по расчетным областям с 03.2022 по 09.2024. Разными цветами показаны области расчета, в которых аномалии появлялись в периоды: серым – в 2022 и феврале 2023, черным – в августе 2023, синим – в октябре 2023 и марте 2024, красным – в январе 2024, оранжевым (на карте справа) – в сентябре 2024 г.

Fig. 1. Dynamics of the distribution of LURR parameter anomalies in the calculated areas from 03.2022 to 09.2024. The calculated areas where anomalies appeared during the following periods are shown in different colors: gray, 2022 and February 2023; black, August 2023; blue, October 2023 and March 2024; red, January 2024; and orange (map on the right), September 2024.

периоды времени, для всей истории применения метода LURR на Сахалине уникальная. Детальное исследование [1] ничего подобного за последние десятилетия не обнаружило. За 1997–2019 гг. было выявлено всего 77 аномалий, тогда как с марта 2022 г. по сентябрь 2024 г. (дата появления последних аномалий на севере острова), т.е. за 2.5 года, их было зафиксировано 35.

После такого потока аномалий LURR отсутствие их в последних трех кварталах 2025 г. видится как разгрузка, однако землетрясений с $M > 5$ на острове так и не произошло. В начале 2025 г. Совет признал несостоявшимся прогноз по северу (четвертый из 5 объявленных), а среднесрочный прогноз землетрясения с $M \geq 5.5 (\pm 0.5)$ в границах от $48.0\text{--}49.5^\circ$ с.ш. и $141.5\text{--}143^\circ$ в.д. продлил, в связи с окончанием срока тревоги (протокол от 09.04.2025 г.), до 31 января 2026 г., расширив зону до $47.0\text{--}49.5^\circ$ (протокол № 2 от 09.04.2025).

Аномалии в 2022–2024 гг. появились в таком количестве, при котором метод LURR становится бесполезным. По сути, из эксперимента по прогнозу сейсмичности острова данным методом выпадают два года. Чем можно объяснить такое аномально напряженное состояние земной коры острова и отсутствие его разгрузки в пределах островного региона? Вполне вероятно, что это обусловлено сейсмическими событиями в соседних регионах субдукционной зоны, опосредованно влияющими на напряженно-деформированное состояние на Сахалине. Например, подготовкой сильного землетрясения на Камчатке

30.07.2025, которое в сочетании с масштабной вулканической активностью уже стало одним из центральных в истории сейсмичности XXI в. В связи с этим мы провели расчеты поведения параметра LURR в области подготовки данного землетрясения.

Параметр LURR позволяет определить возможные признаки подготовки события и выявить периоды, когда напряженно-деформированное состояние в рассматриваемой области соответствует неустойчивому, околокритическому состоянию. Центры для окружностей радиусом в 1° мы располагали по диагонали (как бы двигаясь в юго-западном направлении от эпицентра землетрясения 30.07.2025 на 0.5° по широте и долготе) вдоль зоны субдукции и с максимальным охватом афтершокового облака. В таком случае 7 расчетных областей не только покрыли всю зону афтершоков, но и обеспечили небольшое перекрытие между собой. На рис. 2 приведен скриншот страницы СФ РЭС, где показаны позиции центров расчетных областей и землетрясения с 19.07.2025 по 19.08.2025 (20 июля был зарегистрирован мощный форшок $M = 7.7$). Распределение эпицентров землетрясений в данный период хорошо выделяет облако афтершоков землетрясения 30.07.25.

Центр самой северной расчетной области № 1 (52.5° N, 160.5° E) совпадает с эпицентром землетрясения 30.07.2025 (52.4° N, 160.5° E). Данные для расчетов взяты за последние 5.5 лет (с 2020 г.), что обеспечивает достаточную глубину анализа по методу LURR (время до землетрясения с момента появления пред-

Таблица. Количество землетрясений в расчетных областях с 2020 г. по 30.07.2025
Table. Number of earthquakes in the calculated areas from 2020 to July 30, 2025

Расчетная область	Координаты	Всего событий	Из них $M = 3.3\text{--}5$
1	52.5° N, 160.5° E	891	680
2	52° N, 160° E	869	635
3	51.5° N, 159.5° E	343	230
4	51° N, 159° E	260	121
5	50.5° N, 158.5° E	455	168
6	50° N, 158° E	982	463
7	49.5° N, 157.5° E	1160	547

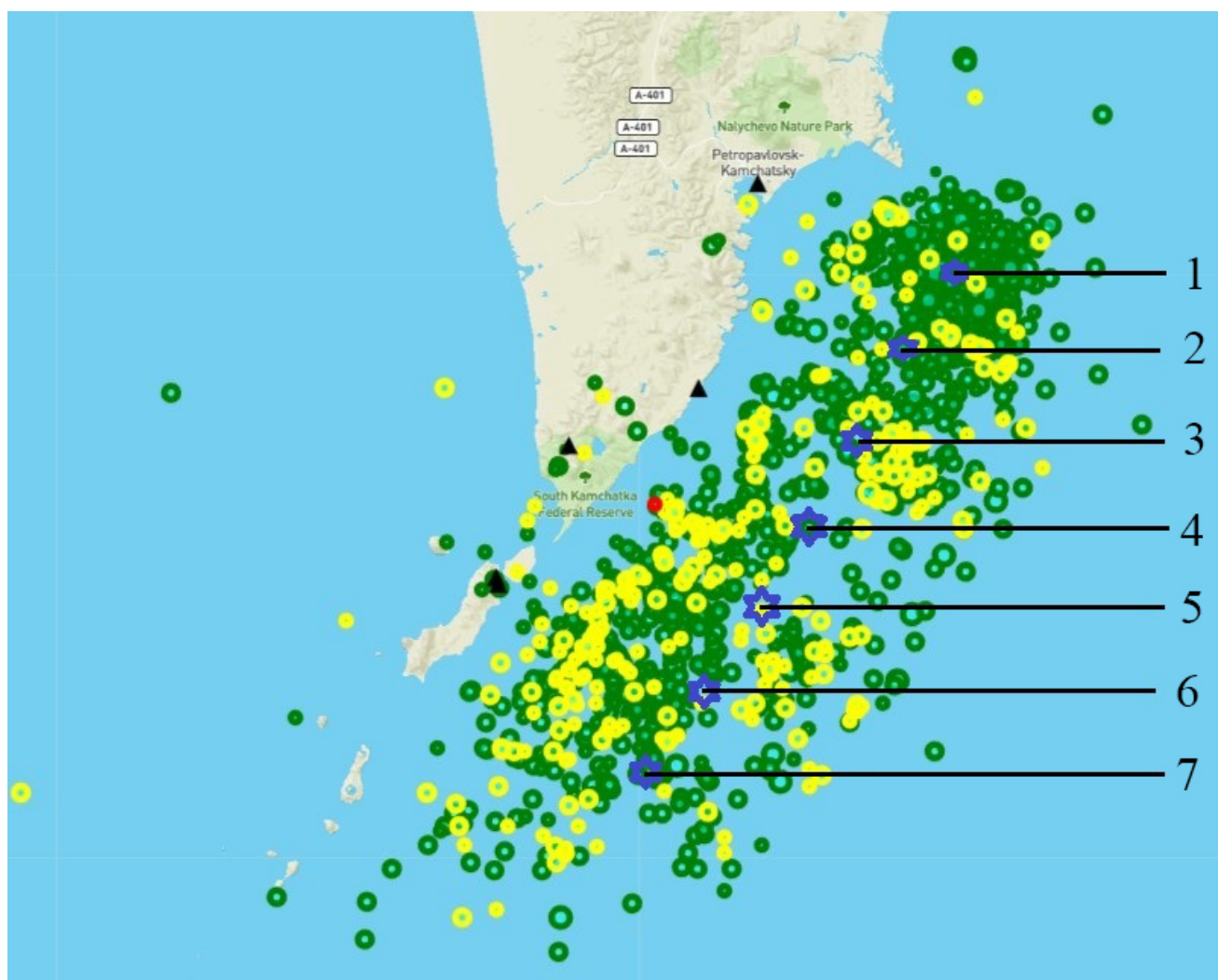


Рис. 2. Карта с официальной страницы веб-сайта СФ РЭС (<http://sakh-res.imgg.ru/realseis.htm>) с землетрясениями в юго-восточной окрестности Камчатки за период с 19.07.2025 по 19.08.2025. Кружками указаны землетрясения за месяц (зеленые), за неделю (желтые) и последнее в периоде (красный). Синие звездочки – центры расчетных областей (кругов радиусом в 1°).

Fig. 2. The map from the official website of the SF RES (<http://sakh-res.imgg.ru/realseis.htm>) with earthquakes in the southeastern part of Kamchatka from July 19, 2025, to August 19, 2025. The circles indicate the earthquakes for the month (green), for the week (yellow), and the last one in the studied period (red). The blue stars are the centers of the calculated areas (circles with a radius of 1°).

вестника до двух лет). В таблице приведены параметры рабочих выборок в семи расчетных областях за исследуемый период. На рис. 3 представлены графики изменения параметра LURR в этих областях.

Как видно из рис. 3, наиболее заметная аномалия выделена в зоне № 5 (порог превышен в феврале 2025 г.), причем за пять с половиной лет она единственная. В зонах № 1 и 7 превышений порога 3 (т.е. аномалий) не зафиксировано, а в зонах № 2, 4, 6 превышение очень незначительное. Если же принять для зоны субдукции порог равный 5, как предлагалось в работе [2], то для всех расчетных обла-

стей (рис. 3) будет выделена только аномалия в зоне № 5, которая появилась за 5 мес. до землетрясения 30.07.2025. Предвестник выделен в расчетной области, которая располагается на 200 км южнее эпицентра землетрясения, однако в пределах очага, который оконтуривается афтершоковым облаком. В любом случае это хороший результат для LURR, ведь размер области расчета сопоставим с этим расстоянием.

Примечательно, что аномалии LURR в 2022–2024 гг. на Сахалине и на Камчатке по времени совпали. На графиках в зонах № 2 и 3 хорошо видны превышения порога в 2022 и 2023 гг., причем в зоне № 3 оно значительное.

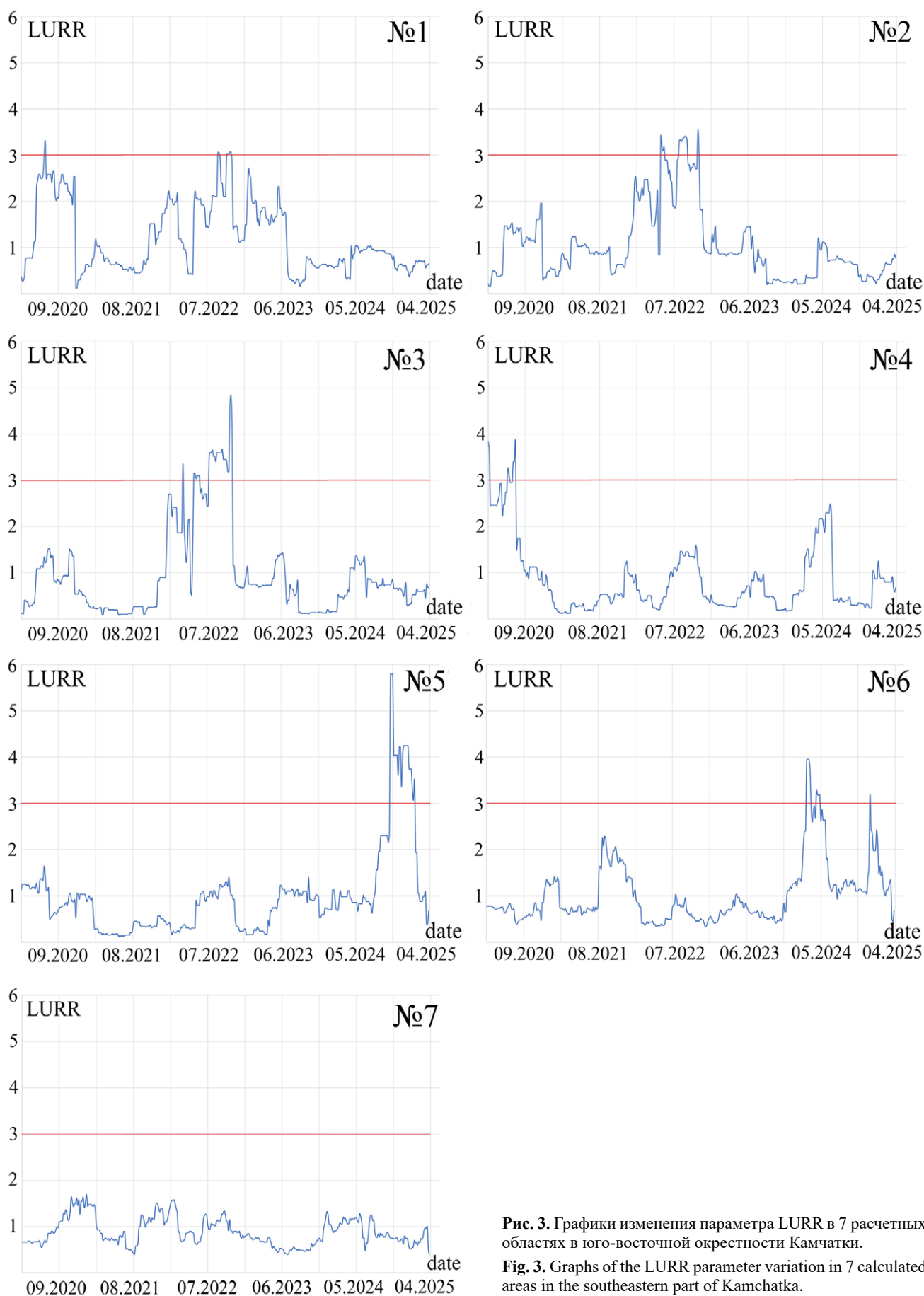


Рис. 3. Графики изменения параметра LURR в 7 расчетных областях в юго-восточной окрестности Камчатки.

Fig. 3. Graphs of the LURR parameter variation in 7 calculated areas in the southeastern part of Kamchatka.

Именно в этот период фиксируется массовое «нашествие» аномалий на Сахалине, причем часть серий даже совпадает с пиками на графиках рис. 3 (к примеру, первые аномалии на Сахалине и Камчатке появились одновременно в марте–мае 2022 г.). Можно предположить, что в состоянии неустойчивости эти два региона были какое-то время одновременно, но на Сахалине аномалии продолжались до сентября 2024 г., а на Камчатке прекратились в середине 2023 г. Вероятно, фокус критических нагрузок на границах Охотской плиты сместился в 2023–2024 гг. к Сахалину, где аномалии продолжались, в отличие от Камчатки. Однако такая ситуация была временной, о чем говорит аномалия в феврале 2025 г. в зоне № 5, после чего на Сахалине обстановка успокоилась, а на Камчатке произошло землетрясение.

Заключение

На очередном этапе эксперимента по использованию метода LURR для среднесрочного прогноза в реальном времени получены интересные результаты.

В течение марта 2022 – сентября 2024 гг. в расчетных областях фиксировались многочисленные аномалии в распределении параметра LURR (35 за два с половиной года), причем в некоторых областях за этот небольшой период аномалии были выявлены неоднократно. В такой ситуации алгоритм прогноза не может быть реализован. В этой связи СФ РЭС временно приостановил регистрацию прогнозов методом LURR.

Поскольку в работах с методом LURR для сейсмичности Сахалина ранее не отмечалось такого количества аномалий за небольшие промежутки времени, сделано предположение, что это связано с изменением напряженно-деформированной обстановки в пространственном масштабе большем, чем изучаемая зона. Источником, повлиявшим на нагрузки, оказываемые на сахалинские разломы (и, соответственно, на появление аномалий LURR), могла стать заключительная стадия подготовки землетрясения 30.07.2025, M 8.8 на юго-востоке

Камчатки. Для обоснования данного предположения проведены расчеты параметра LURR в 7 расчетных областях в районе эпицентра данного землетрясения.

В области, которая расположена на 200 км южнее от эпицентра землетрясения 30.07.2025, был выделен предвестник (аномалия LURR) в феврале 2025 г. Наряду с этим в прилегающих к эпицентру областях отмечены аномалии в 2022–2023 гг., что соответствует периоду большого количества аномалий на Сахалине. Такой результат позволяет предположить влияние подготовки Камчатского землетрясения на напряженно-деформированную обстановку в сахалинских зонах возможных очагов землетрясений.

Список литературы

1. Закупин А.С., Богинская Н.В. **2021**. Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы. *Геосистемы переходных зон*, 5(1): 27–45. <https://doi.org/10.30730/grtz.2021.5.1.027-045>
2. Закупин А.С., Андреева М.Ю. **2022**. Особенности применения метода LURR для анализа сейсмичности Южных Курильских островов. *Тихоокеанская геология*, 41(3): 37–49. doi:10.30911/0207-4028-2022-41-3-37-49; EDN FCTZIT
3. Закупин А.С., Костылева Н.В., Костылев Д.В. **2023**. От ретроспективы к системе реального времени – прогноз землетрясений методом LURR на Сахалине (2019–2022 гг.). *Геосистемы переходных зон*, 7(1): 54–74. <https://doi.org/10.30730/grtz.2023.7.1.054-064.064-074>; EDN KBLEXP
4. Kossobokov V.G. **2013**. Earthquake prediction: 20 years of global experiment. *Natural Hazards*, 69(2): 1155–1177. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0198-1>
5. Yin X.C., Zhang L.P., Zhang H.H., Yin C., Wang Y., Zhang Y., Peng K., Wang H., Song Z., Yu H., Zhuang J. **2006**. LURR's twenty years and its perspective. *Pure Applied Geophysics*, 163: 2317–2341. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0135-x>
6. Yin X., Yin C. **1991**. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction. *Science in China*, 34: 977–986.
7. Yin X.C., Chen X.Zh., Song Zh.P., Yin C. **1995**. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure Applied Geophysics*, 145(3-4): 701–715. <https://doi.org/10.1007/bf00879596>

References

1. Zakupin A.S., Boginskaia N.V. **2021**. Mid-term earthquake prediction using the LURR method on Sakhalin Island: A summary of retrospective studies for 1997–2019 and new approaches. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 5(1): 27–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.027-045>
2. Zakupin A.S., Andreeva M.Yu. **2022**. Application of the LURR method for studying seismicity in the Southern Kuril Islands. *Russian Journal of Pacific Geology*, 16(3): 205–217. <https://doi.org/10.1134/s1819714022030071>
3. Zakupin A.S., Kostyleva N.V., Kostylev D.V. **2023**. From retrospective to real-time system – LURR earthquake prediction on Sakhalin (2019–2022). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 7(1): 54–74. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.054-064.064-074>; EDN KBLEXP
4. Kossobokov V.G. **2013**. Earthquake prediction: 20 years of global experiment. *Natural Hazards*, 69(2): 1155–1177. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0198-1>
5. Yin X.C., Zhang L.P., Zhang H.H., Yin C., Wang Y., Zhang Y., Peng K., Wang H., Song Z., Yu H., Zhuang J. **2006**. LURR's twenty years and its perspective. *Pure Applied Geophysics*, 163: 2317–2341. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0135-x>
6. Yin X., Yin C. **1991**. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction. *Science in China*, 34: 977–986.
7. Yin X.C., Chen X.Zh., Song Zh.P., Yin C. **1995**. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure Applied Geophysics*, 145(3-4): 701–715. <https://doi.org/10.1007/bf00879596>

Об авторе

Закупин Александр Сергеевич (<https://orcid.org/0000-0003-0593-6417>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск; зам. директора по научной работе, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия, dikii79@mail.ru

About the Author

Zakupin, Alexander S. (<https://orcid.org/0000-0003-0593-6417>), Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Leading Researcher at the Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk; Deputy Director, Sakhalin Branch of the Federal Research Center of Geophysical Survey of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, dikii79@mail.ru

Поступила 20.08.2025

Принята к публикации 28.08.2025

Received 20 August 2025

Accepted 28 August 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 550.34.06.013.3

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.doa-355>

<https://elibrary.ru/pnohgu>

Опубликована online 30.07.2025

Определение моментов времени вступления сейсмических сигналов на основе анализа их фазовых характеристик

П. Н. Александров^{@1}, Л. В. Стасенко²

^{@E-mail:} alexandr@igemi.troitsk.ru

¹ Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Троицк, Россия

² Научная станция РАН в г. Бишкек, Киргизская Республика

Резюме. В статье рассматриваются методические вопросы применения фазовых характеристик к определению моментов прихода сейсмических волн. Точность локации землетрясений зависит от точности определения времен прихода продольных, поперечных и поверхностных волн. Определение фазовых характеристик сейсмических волн имеет особое значение для локации близких землетрясений, поскольку для дальних событий эти волны разделяются. Исследованы способы определения моментов вступления сейсмических волн различной природы, характеризующихся разными частотами, на основе анализа фазовых характеристик сигналов от сейсмических событий. Рассмотрены теоретические основы данного подхода и приведены результаты обработки сейсмических данных по определению времен прихода волновых пакетов соответствующих упругих волн, связанных с землетрясениями.

Ключевые слова: землетрясения, преобразование Гильберта, фазовый спектр, время вступления

Determination of the arrival time of seismic signals based on the analysis of their phase characteristics

Pavel N. Aleksandrov^{@1}, Liya V. Stasenko²

^{@E-mail:} alexandr@igemi.troitsk.ru

¹ Geoelectromagnetic Research Centre of the Schmidt Institute of the Earth of RAS, Moscow, Troitsk, Russia

² Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyz Republic

Abstract. The article discusses methodological issues of applying phase characteristics in determining the arrival time of seismic waves. The accuracy of earthquake location depends on the precision with which the arrival times of longitudinal, transverse, and surface waves can be determined. Determining the phase characteristics of seismic waves is crucial for locating nearby earthquakes, since these waves are different for distant earthquakes. Methods for determining the arrival times of seismic waves of various natures characterized by different frequencies are investigated based on the analysis of the phase characteristics of signals from seismic events. Theoretical underpinnings of this approach are considered, and the results of processing seismic data on determining the arrival times of wave packets of the corresponding elastic waves associated with earthquakes are presented.

Keywords: earthquakes, Hilbert transform, phase spectrum, arrival time

Для цитирования: Александров П.Н., Стасенко Л.В. Определение моментов времени вступления сейсмических сигналов на основе анализа их фазовых характеристик. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 3, с. 265–276. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.doa-355.pdf>; <https://www.elibrary.ru/pnohgu>

For citation: Aleksandrov P.N., Stasenko L.V. Determination of the arrival time of seismic signals based on the analysis of their phase characteristics. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 3, pp. 265–276. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.doa-355>

Введение

Изучение сейсмических волн, возникающих при землетрясениях, играет важную роль, поскольку позволяет определить основные характеристики как среды распространения, так и очага события. При изучении землетрясений основное внимание уделяется оценке геометрических и кинематических параметров сейсмического поля, включая местоположение, магнитуду, размеры разломов и очаговые механизмы. Сейсмические волны, связанные с землетрясениями, по характеру распространения делятся на продольные, поперечные и поверхностные. Продольная Р-волна (primary, первичная) – это волна типа звуковой, связанная

с процессами сжатия и растяжения горной породы при распространении в геологической среде. Поперечная S-волна (secondary, вторичная) обладает сдвиговым механизмом передачи возмущения. Поверхностные волны называют L-волнами, или длинными (long), так как период колебаний у них больше, чем у Р- и S-волн. Эти волны представляют собой сочетание двух типов: волн Лява LQ (поперечные колебания), и волн Релея LR (частицы перемещаются по эллипсам вдоль и поперек поверхности границы раздела сред) [1]. Характерный вид сигналов от удаленного и близкого землетрясений представлен на рис. 1.

Точность определения амплитуд и времени прихода сейсмической волны обуславливается отношением сигнал/шум и степенью совпадения спектрального состава волны с полосой пропускания регистрирующей аппаратуры. Первоочередной задачей в процессе обработки сейсмических сигналов является обнаружение самого сигнала – определение моментов вступления волн. Очень важно в этих случаях правильно интерпретировать фазы Р-, S- и L-волн [3]. Для дальних землетрясений проблема определения моментов прихода волн стоит не так остро, как в случае близких землетрясений. Поскольку при близких расстояниях от эпицентра землетрясений происходит очевидное наложение сейсмических волн, в процессе обработки могут возникать трудности в определении фаз первых вступлений Р-, S- и L-волн.

Задачу локации землетрясений можно разделить на две подзадачи – обнаружение сигнала и его анализ. Для определения моментов времени вступлений Р-, S- и L-волн сейсмология стала использовать широкий спектр разнообразных методов.

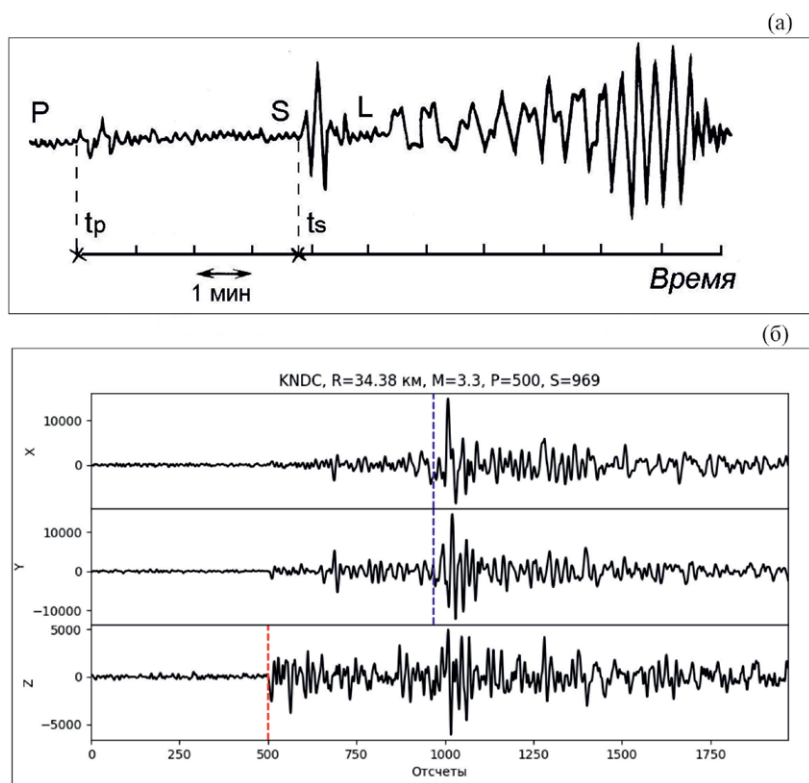


Рис. 1. Характер распространения упругих волн в сплошной среде для удаленного (регионального) сейсмического события (а) [2] и близкого (локального) сейсмического события (б) из регионального сейсмического каталога Научной станции РАН, по данным сети KNET (Киргизской сейсмической телеметрической сети; <https://doi.org/10.7914/SN/KN>). Показано последовательное вступление волн продольных Р, поперечных S и поверхностных L соответствующих волновых пакетов.

Fig. 1. The nature of the propagation of elastic waves in a continuous medium for a remote (regional) seismic event (a) [2] and for a nearby (local) seismic event (b) from the regional seismic catalog of the Research Station of the RAS, according to the KNET network data (Kyrgyz Seismic Telemetry Network; <https://doi.org/10.7914/SN/KN>). The sequential arrival of waves in the form of longitudinal P-waves, transverse S-waves, and surface L-waves of corresponding wave packets is illustrated.

Обзор методов анализа сейсмических сигналов

В сейсмологии на сегодняшний день наиболее распространенным алгоритмом детектирования является алгоритм STA/LTA. Данный метод по обнаружению фаз сейсмических волн основан на анализе отношения амплитуд в коротком и длинном временных окнах. Эта методика описана в работах [3–5]. В публикациях [6, 7] предложен подход, основанный на вейвлет-преобразовании сейсмических сигналов. Данный метод позволяет отображать сигнал как во временной, так и в частотной областях, может разделять сигнал и шум, связанный с Р-волнами. Применениям фрактальных свойств сигналов от землетрясений посвящены многочисленные публикации [8–10]. В работе [11] показано, что свойства мультифрактального спектра могут быть использованы для обнаружения прихода сейсмической волны, оценки ее длительности и разделения Р-, S- и L-волн. В основе фрактального анализа выявлено, что фоновые шумовые участки сигналов демонстрируют монофрактальное поведение. Изменение фрактальных свойств записи землетрясения позволяет определить момент прихода сейсмической волны. Для анализа записей сигналов и обнаружения первых вступлений сейсмических волн также применяются модели глубокого машинного обучения [12, 13]. В статьях [14, 15] рассматривается архитектура и апробация модели разработанной авторами нейронной сети, основной функционал которой направлен на автоматическое выделение фаз Р- и S-волн. Указанные методы, как и другие методы по обнаружению первых вступлений сейсмических волн, основаны на индивидуальных положениях и математических техниках, используемых для решения задачи локации землетрясений. Все они сталкиваются с проблемой определения первых моментов вступления сейсмических сигналов для близких землетрясений.

В настоящей работе предложен способ определения моментов вступления волн, основанный на анализе фазовых характеристик

сейсмических сигналов, прежде всего от близких землетрясений, когда происходит суперпозиция Р-, S-, L-волн, что затрудняет определение моментов их вступлений. Фазовые характеристики сигналов анализируются как во временной, так и в частотной областях.

Теория и методика анализа фазовых характеристик сейсмических сигналов

Во временной области фазовые характеристики широко используются в сейсморазведке с целью получения мгновенных частот [2]. Рассмотрим этот подход для определения моментов вступления сейсмических волн.

Мгновенные частоты

Пусть имеется сигнал по времени $S(t)$, состоящий из разных частот. Полагая, что спектр этого сигнала определен только на положительной оси частот (при отрицательных частотах спектр полагается равным нулю), то во временной области сигнал будет удовлетворять преобразованию Гильберта [2]. Отсюда мнимую часть временного сигнала $I(t)$ можно найти из выражения [16]:

$$I(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S(v)}{t-v} dv.$$

Тогда комплексный сигнал во времени будет иметь вид

$$\check{S}(t) = S(t) + iI(t) = |S(t) + iI(t)|e^{i\varphi(t)},$$

где $\varphi(t)$ – фаза комплексного сигнала; $|S(t) + iI(t)| = |\check{S}(t)|$ – модуль комплексного сигнала (огibaющая сигнала во времени $S(t)$); $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица. Фаза комплексного сигнала, как и фазовый спектр в случае использования преобразования Фурье, определяется с точностью $2\pi m$ (m – целое число). Однако существуют приемы восстановления непрерывного фазового спектра, например, с помощью оператора `unwgap` программного пакета MATLAB. Оператор `unwgap` корректирует

фазовые углы в радианах вектора P , добавляя значения, кратные $\pm 2\pi$, когда абсолютные значения скачков между последовательными элементами P больше или равны допуску скачков по умолчанию, равному π радианам. Далее будем использовать только восстановленный фазовый спектр.

Производная по времени от фазы $\varphi(t)$ определяет мгновенную частоту $\omega = \frac{\partial}{\partial t} \varphi(t)$, которая эквивалентна наклону графика фазы комплексного сигнала $\varphi(t)$. Результаты ис-

пользования преобразования Гильберта представлены на рис. 2.

Как следует из рис. 2 А, излом графика фазы указывает на момент времени вступления волны, а наклон – на частоту этой волны.

На рис. 2 Б представлен тот же результат с наложенной помехой (случайная последовательность чисел, распределенных по нормальному закону) $P(t)$ в 10 раз меньше, чем максимальная амплитуда сигнала: $|P(t)| < \max|S(t)|/10$: $\tilde{S}(t) = \tilde{S}(t) + P(t)$.

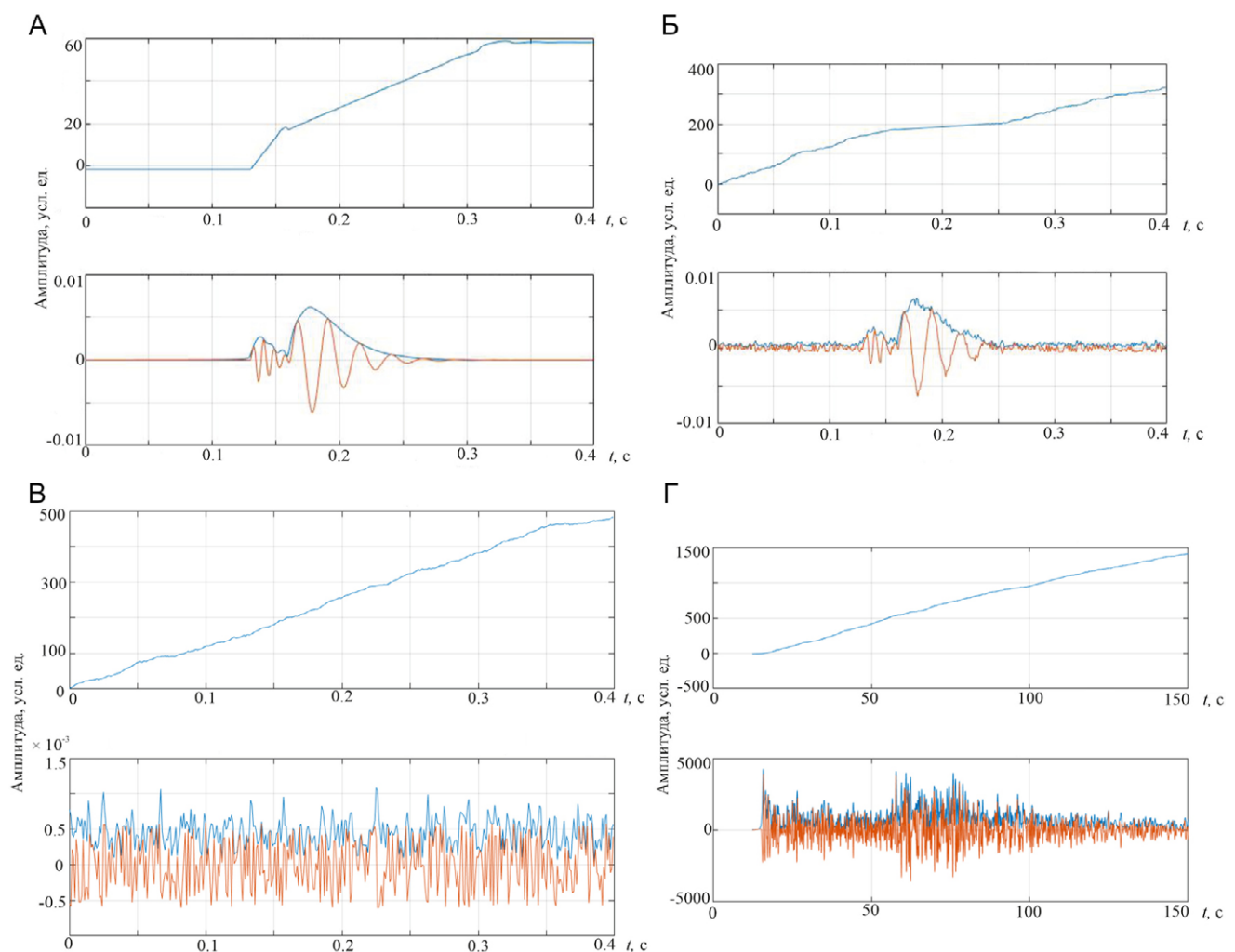


Рис. 2. Результаты использования преобразования Гильберта.

На верхних графиках частей А–Г фаза комплексного сигнала. Нижние графики: А – сигнал во времени (красная кривая) и его огибающая (синяя кривая); Б – сигнал во времени (красная кривая) и его огибающая (синяя кривая) с наложенной помехой в 10 раз меньше, чем максимальная амплитуда сигнала; В – результат применения преобразования Гильберта к помехе: сигнал помехи во времени (красная кривая) и его огибающая (синяя кривая); Г – сигнал во времени (красная кривая) и его огибающая (синяя кривая) для реального сигнала зарегистрированного сейсмического поля от землетрясения.

Fig. 2. Upper plots illustrate the complex signal phase. Bottom plots: А, the signal in time (red curve) and its envelope (blue curve); Б, the signal in time (red curve) and its envelope (blue curve) with superimposed interference 10 times less than the maximum signal amplitude; В, the results of using the Hilbert transform to the interference in time (red curve) and its envelope (blue curve); Г, the signal in time (red curve) and its envelope (blue curve) for the actual seismic field signal recorded from the earthquake.

Из рис. 2 Б следует, что при наличии помех установить момент вступления сигналов затруднительно, хотя наклоны позволяют определять частоты сигналов.

Рис. 2 В показывает результаты обработки в случае отсутствия искомых сигналов.

На рис. 2 Г представлен практический пример применения преобразования Гильберта для реального сигнала от землетрясения. Для этого использовались данные регионального сейсмического каталога Научной станции РАН (<https://doi.org/10.7914/SN/KN>). На рис. 2 Г на верхнем графике приведен фрагмент записи сейсмического события со станции BOOM $R = 132.56$ км, $M = 4.4$ (Z-компонента), с шагом дискретизации $\Delta t = (1/40)$ с, на нижнем – результат использования преобразования Гильберта. Практический пример показывает, что использование мгновенных частот, как следует из рис. 2, для анализа сигналов от землетрясений не дало положительных результатов.

Таким образом, на основе математического моделирования проведен анализ использования преобразования Гильберта для обработки сейсмических сигналов от землетрясений с целью выделения времени вступления сигналов различной частоты. При применении данного подхода помеха осложняет определение моментов вступления волн. Однако этот подход может быть использован для выделения сигналов от сейсмических событий при регистрации упругих полей.

Анализ фазового спектра

Рассмотрим следующую задачу – анализ фазового спектра в частотной области при применении к регистрируемым сигналам преобразования Фурье с целью определения моментов прихода сейсмических волн от землетрясений.

Пусть выделено зарегистрированное поле от сейсмического события во временной области $S(t)$. Перейдем в частотную область с использованием преобразования Фурье в

виде $F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)e^{i\omega t} dt = |F(\omega)|e^{i\varphi(\omega)}$, где $F(\omega)$ – спектр сигнала $S(t)$; t – время; ω – круговая частота ($\omega = 2\pi f$ ГЦ); $|F(\omega)|$ – амплитудный спектр; $\varphi(\omega)$ – фазовый спектр.

Рассмотрим несколько случаев. Пусть сигнал во временной области имеет вид дельта-функции Дирака, появляющейся в момент времени t_0 : $S(t) = \delta(t - t_0)$ (рис. 3 а). Тогда фазовый спектр имеет вид линейной функции частоты $\varphi(\omega) = \omega t_0$. Наклон этой функции определяется временем t_0 . Следовательно, по наклону фазового спектра можно судить о времени появления сигнала. Схематически это показано на рис. 3 б.

Рассмотрим волновой пакет с ограниченным носителем, например типа импульса Рикера [17]. В дискретном виде волновой пакет в частотной области будем описывать в следующем виде:

$$S(\omega) = \sum_{j=1}^N I_j \int_{t_j - \Delta t/2}^{t_j + \Delta t/2} e^{i\omega t} d\tau, \quad (1)$$

где Δt – шаг дискретизации по времени, j – номер отсчета во временной области, N – количество отсчетов в волновом пакете, I_j – амплитуда сигнала для номера отсчета j , ω – частота.

Тогда

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \sum_{j=1}^N I_j \frac{e^{i\omega(t_j + \frac{\Delta t}{2})} - e^{i\omega(t_j - \frac{\Delta t}{2})}}{i\omega} = \\ &= \sum_{j=1}^N I_j e^{i\omega t_j} 2i \frac{\sin(\frac{\omega \Delta t}{2})}{i\omega}. \end{aligned}$$

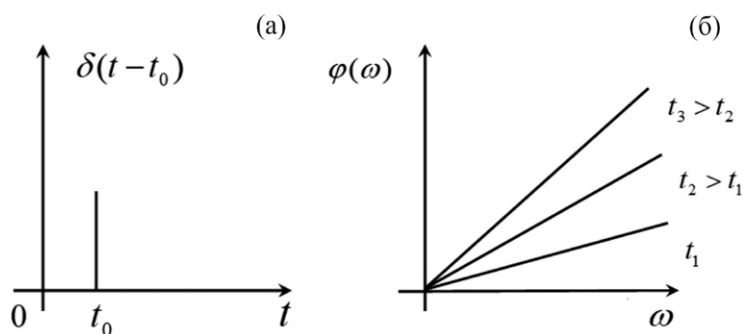


Рис. 3. Схематическое изображение дельта-функции Дирака (а) и ее фазового спектра (б) в зависимости от времени начала сигнала. Времена начала сигнала обозначены знаками $t_0 = \{t_1, t_2, t_3\}$.

Fig. 3. Schematic representation of the Dirac delta function (a) and its phase spectrum (b), depending on the signal arrival time; arrival times are indicated by signs $t_0 = \{t_1, t_2, t_3\}$.

Полагая аргумент синуса малым, получим:

$S(\omega) \approx \sum_{j=1}^N I_j e^{i\omega t_j} \Delta t$, что представляет собой интегральную сумму [16] для эквидистантного способа регистрации сигнала. Устремляя Δt к нулю, в пределе получим

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{j=1}^N I_j e^{i\omega t_j} \Delta t = \int_{t_0}^{t_0+T} I(\tau) e^{i\omega \tau} d\tau,$$

где t_0 – момент начала волнового пакета, T – его длительность, которую можно устремить в бесконечность. Отсюда получим спектр волнового пакета в амплитудно-фазовом виде:

$$\int_{t_0}^{t_0+T} I(\tau) e^{i\omega \tau} d\tau = |S(\omega)| e^{i\varphi(\omega)} e^{i\omega t_0}, \text{ где уч-}$$

тено, что начало сигнала может быть сдвинуто от начала координат на величину t_0 .

Таким образом, фазовый спектр волнового пакета будет описываться функцией $\tilde{\varphi} = \varphi(\omega) + \omega t_0$. Согласно теории преобразования Фурье, большие частоты в спектре сигналов описывают сигнал на ранних временах регистрации. Это позволяет определить фазовые характеристики волнового пакета при анализе фазового спектра на больших частотах. В случае рассмотрения сейсмических сигналов это позволяет исследовать свойства сигналов для продольных волн.

Проведем анализ средних и нижних частот фазового спектра.

Волновой пакет во временной области, иллюстрирующий выражение (1), представлен на рис. 4 а, фазовый спектр – на рис. 4 б.

Дополним высокочастотный сигнал низкочастотными и рассмотрим суперпозицию волновых пакетов с целью их разделения. При этом не обязательно, чтобы низкочастотный сигнал появлялся после высокочастотного. Пусть суперпозиция волновых пакетов f_1 и f_2 волн, возможно разных типов, распространяющихся в среде от одного источника в одном направлении с разными скоростями, имеет вид, изображенный на рис. 5.

На рис. 5 б виден излом в фазовом спектре. Аппроксимируем этот график кусочно-линейной функцией. Построим функционал

$$\sum_{j=1}^n (\varphi_j - a_1 \omega_j - b_1)^2 + \sum_{j=n+1}^N (\varphi_j - a_2 \omega_j - b_2)^2 = \delta^2,$$

где a_1, b_1 – константы первой прямой, a_2, b_2 – константы второй прямой, n – номер отсчета, где сочленяются прямые.

Нахождение констант a_1, b_1 и a_2, b_2 методом наименьших квадратов сводится к решению двух систем линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} a_1 \sum_{j=1}^n \omega_j^2 + b_1 \sum_{j=1}^n \omega_j = \sum_{j=1}^n \varphi_j \omega_j, \\ a_1 \sum_{j=1}^n \omega_j + b_1 n = \sum_{j=1}^n \varphi_j \end{cases}$$

и

$$\begin{cases} a_2 \sum_{j=n+1}^N \omega_j^2 + b_2 \sum_{j=n+1}^N \omega_j = \sum_{j=n+1}^N \varphi_j \omega_j, \\ a_2 \sum_{j=n+1}^N \omega_j + b_2 (N - n) = \sum_{j=n+1}^N \varphi_j. \end{cases}$$

Основная задача – нахождение номера n . Для ее решения, после нахождения коэффициентов a_1, b_1 и a_2, b_2 , найдем $\delta^2 = \delta^2(n)$, перебирая значения n . По минимуму этой функции найдем номер отсчета n_m , где соединяются прямые. Аппроксимация ломаной фазового спектра будет равна

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} a_1 \omega + b_1, & \omega_1 < \omega < \omega_{n_m} \\ a_2 \omega + b_2, & \omega_{n_m+1} < \omega < \omega_N \end{cases}$$

Результат вычисления функционала $\delta^2 = \delta^2(n)$ представлен на рис. 6 а, фазовый спектр (восстановленный) и результаты его аппроксимации – на рис. 6 б.

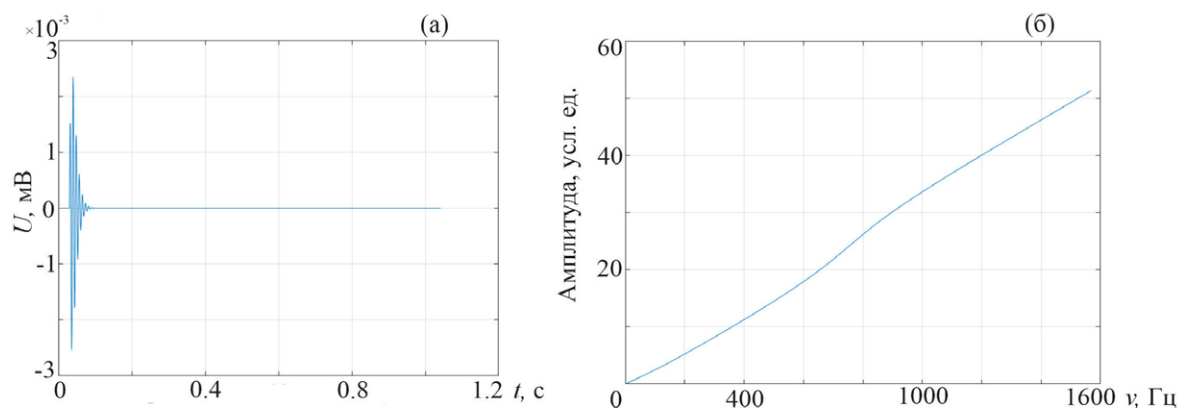


Рис. 4. Пример волнового пакета во временной области на основе формы импульса вида $te^{-at} \sin(\omega t)$ с параметрами $a = 140 \text{ с}^{-1}$, $\omega = 753 \text{ Гц}$, с шагом дискретизации $\Delta t = 1 \text{ мс}$ (а); его фазовый спектр (б); время начала высокочастотного сигнала 0.025787 с .

Fig. 4. An example of a time domain wave packet based on the pulse shape $te^{-at} \sin(\omega t)$ with parameters $a = 140 \text{ s}^{-1}$, $\omega = 753 \text{ Hz}$ and a sampling step $\Delta t = 1 \text{ ms}$ (a); its phase spectrum (b); the arrival time of the high-frequency signal is 0.025787 s .

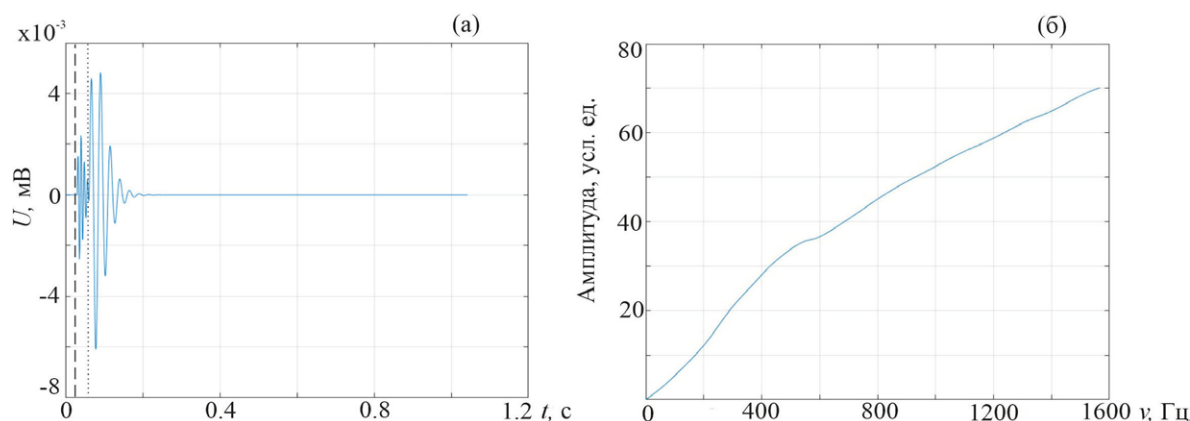


Рис. 5. Пример суперпозиции «высокочастотного» f_1 (штриховая линия) и «низкочастотного» f_2 (пунктирная линия) волновых пакетов (а); фазовый спектр суперпозиции высокочастотного и низкочастотного сигналов во временной области (б).

Fig. 5. An example of a superposition of “high-frequency” f_1 (dashed line) and “low-frequency” f_2 (dotted line) wave packets (a); the phase spectrum of superposition of high-frequency and low-frequency signals in the time domain (b).

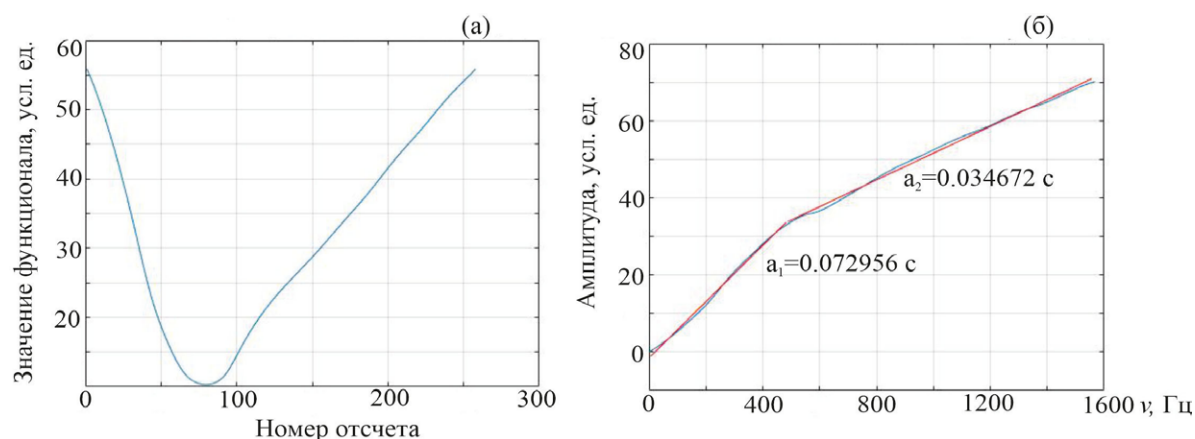


Рис. 6. (а) Минимум функционала находится в точке с номером отсчета $n_m = 80$. Он соответствует частоте $\omega_{n_m} = 482.3943 \text{ Гц}$. (б) Фазовый спектр (восстановленный) (синяя линия) и результат его аппроксимации (красная линия). a_1 и a_2 – время начала низкочастотного и высокочастотного сигналов соответственно.

Fig. 6. (a) The minimum of the functional is located at the point with the reference number $n_m = 80$. It corresponds to the frequency $\omega_{n_m} = 482.3943 \text{ Hz}$. (b) The phase spectrum (reconstructed) (blue line) and the result of the polyline approximation (red line). a_1 and a_2 indicate the arrival time of low-frequency and high-frequency signals, respectively.

Практический пример разделения упругого поля

Применим рассмотренный подход к обработке сейсмических данных, зарегистрированных от сейсмических событий. Как известно, сейсмические сигналы состоят из трех типов волн (суперпозиции) – высокочастотные (продольные волны, приходящие раньше других), среднечастотные (поперечные, приходящие позже продольных) и низкочастотные (поверхностные, приходящие после поперечных). Пусть выделено зарегистрированное поле от сейсмического события во временной области $S(t)$. График фазового спектра представляет собой совокупность трех прямых, осложненных отклонениями. Следовательно, необходимо аппроксимировать их ломаной (кусочно-линейными функциями), состоящей из трех прямых.

Построим функционал:

$$\sum_{j=1}^{n_1} (\varphi_j - a_1 \omega_j - b_1)^2 + \sum_{j=n_1+1}^{n_2} (\varphi_j - a_2 \omega_j - b_2)^2 + \sum_{j=n_2+1}^N (\varphi_j - a_3 \omega_j - b_3)^2 = \delta^2,$$

где a_1, b_1 – константы первой прямой, a_2, b_2 – константы второй прямой, a_3, b_3 – константы третьей прямой, n_1, n_2 – номера отсчетов, где сочленяются прямые.

Следовательно, функционал является функцией номеров отсчетов $\delta^2 = \delta^2(n_1, n_2)$. Задача заключается в нахождении номеров отсчетов n_1, n_2 , где функционал δ^2 принимает минимальное значение. Решение этой задачи может быть получено простым перебором значений n_1, n_2 при условии $n_1 < n_2$. Это требование следует из учета принципа причинности в том смысле, что сначала приходят продольные высокочастотные волны, далее среднечастотные поперечные волны и последними – низкочастотные поверхностные волны [2].

Кроме того, с формальной точки зрения, фазовый спектр как функция частоты должен быть однозначной функцией [16].

Нахождение констант a_1, b_1 ; a_2, b_2 и a_3, b_3 методом наименьших квадратов сводится к решению двух систем линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} a_1 \sum_{j=1}^{n_1} \omega_j^2 + b_1 \sum_{j=1}^{n_1} \omega_j = \sum_{j=1}^{n_1} \varphi_j \omega_j \\ a_1 \sum_{j=1}^{n_1} \omega_j + b_1 n_1 = \sum_{j=1}^{n_1} \varphi_j \end{cases},$$

$$\begin{cases} a_2 \sum_{j=n_1+1}^{n_2} \omega_j^2 + b_2 \sum_{j=n_1+1}^{n_2} \omega_j = \sum_{j=n_1+1}^{n_2} \varphi_j \omega_j \\ a_2 \sum_{j=n_1+1}^{n_2} \omega_j + b_2 (n_2 - n_1) = \sum_{j=n_1+1}^{n_2} \varphi_j \end{cases}$$

и

$$\begin{cases} a_3 \sum_{j=n_2+1}^N \omega_j^2 + b_3 \sum_{j=n_2+1}^N \omega_j = \sum_{j=n_2+1}^N \varphi_j \omega_j \\ a_3 \sum_{j=n_2+1}^N \omega_j + b_3 (N - n_2) = \sum_{j=n_2+1}^N \varphi_j \end{cases}.$$

Основная задача – нахождение номеров n_1, n_2 . Для ее решения, после нахождения коэффициентов a_1, b_1 ; a_2, b_2 ; a_3, b_3 , найдем $\delta^2 = \delta^2(n_1, n_2)$. По минимуму этой функции найдем номера отсчетов n_1, n_2 , где соединяются прямые. Аппроксимация ломаной фазового спектра будет равна:

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} a_1 \omega + b_1, \omega_1 < \omega < \omega_{n_1} \\ a_2 \omega + b_2, \omega_{n_1+1} < \omega < \omega_{n_2} \\ a_3 \omega + b_3, \omega_{n_2+1} < \omega < \omega_N. \end{cases}$$

Рассмотрим два примера обработки записей от землетрясений, произошедших на территории Тянь-Шаня, с использованием данной методики (см. таблицу). Для практического примера применялись данные градиентной установки, расположенной на Научной станции

РАН [18, 19]. В качестве сейсмических датчиков для установки используются датчики скорости смещения GS-20DX фирмы Geospace. Градиентная установка обеспечивает непрерывную синхронную регистрацию сейсмических сигналов (абсолютная погрешность 10.5 мкс), с частотой дискретизации сигналов 1000 Гц.

Для первого примера взят фрагмент записи сигнала от землетрясения, зарегистрированного градиентной установкой 03.04.2024 г., $M = 0.62$ (Z-компонента), эпицентр Таш-Мойнок на расстоянии 7 км от измерительного пункта (рис. 7, I а). Для данного фрагмента записи на основе изложенного алгоритма получена

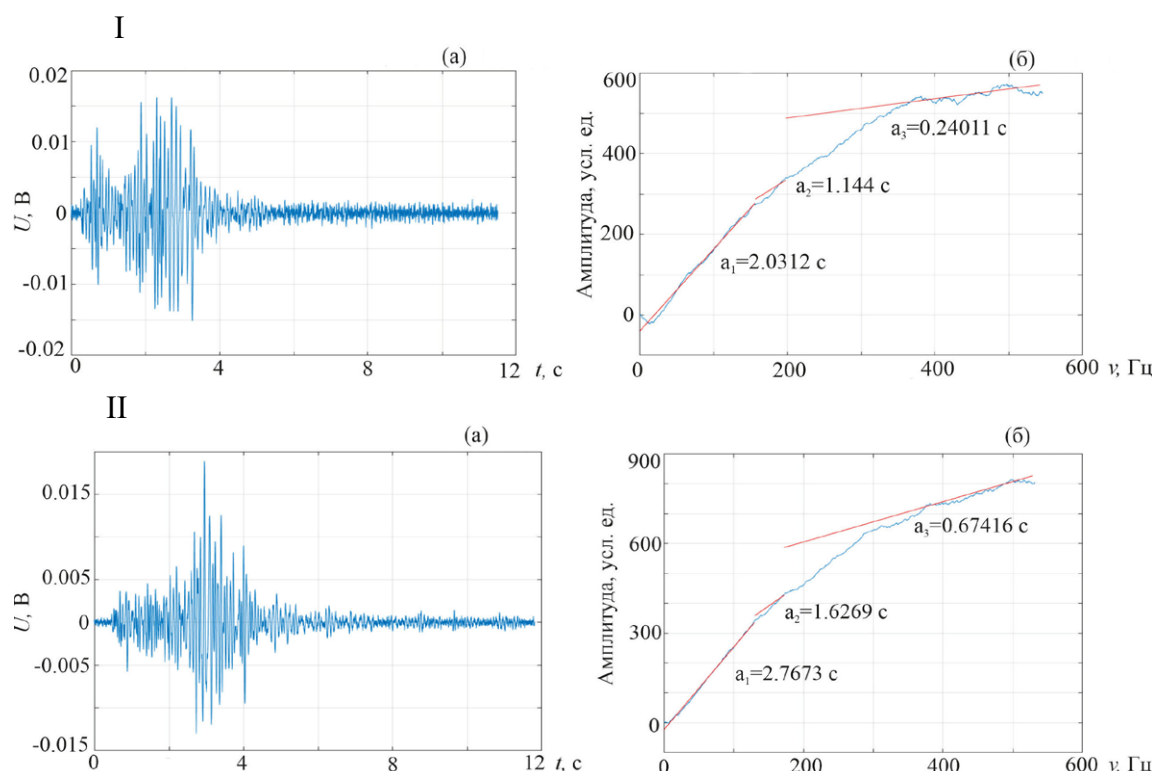


Рис. 7. Фрагменты записи сигналов I и II от землетрясений (а) и результаты аппроксимации фазового спектра кусочно-линейной функцией (б). a_1 , a_2 , a_3 – время начала низкочастотного, среднечастотного и высокочастотного сигналов соответственно.

Fig. 7. The fragments of the recordings of earthquake signals I and II (a) and the results of approximating the phase spectrum with a piecewise linear function (b); a_1 , a_2 , and a_3 indicate the arrival time of low-frequency, mid-frequency, and high-frequency signals, respectively.

Таблица. Результаты обработки сигналов от сейсмических событий

Table. The results of signal processing of seismic events

№	Время начала сигнала, с			Разность времен прихода волн, с			Стандартное отклонение сигнала		
	P, a_3 (с)	S, a_2	L, a_1	S–P, $a_2 - a_3$	L–P, $a_1 - a_3$	L–S, $a_1 - a_2$	P _{ст}	S _{ст}	L _{ст}
I	0.24011	1.144	2.0312	0.90386	1.7911	0.8872	48.1194	7.5066	9.4734
II	0.67416	1.6269	2.7673	0.95269	2.0931	1.1404	48.4982	6.6005	5.4793

Примечание. L – низкочастотный сигнал, S – среднечастотный, P – высокочастотный. a_1 , a_2 , a_3 – время начала низкочастотного, среднечастотного и высокочастотного сигналов соответственно.

Note. L indicates low-frequency signal; S, mid-frequency signal; P, high-frequency signal. a_1 , a_2 , and a_3 indicate the arrival time of low-frequency, mid-frequency, and high-frequency signals, respectively.

аппроксимация кусочно-линейной функцией фазового спектра (рис. 7, I б).

Для второго примера взят фрагмент записи от землетрясения, зарегистрированного градиентной установкой 03 21.06.2024 г. $M = 0.6$ (Z-компонента), эпицентр Теплые ключи на расстоянии 8 км от измерительного пункта. Результат аппроксимации для записи землетрясения (рис. 7, II а) представлен на рис. 7, II б.

Изложенная интерпретация результатов обработки основана на рабочей гипотезе о Р-, S-, L-волнах от землетрясений. Модель не отражает в полной мере реальную ситуацию.

Отметим, что в случае регистрации сигналов с большим шагом дискретизации (40 Гц), использованных для стандартной регистрации сейсмических событий, применение рассмотренного подхода затруднительно.

Однако даже в случае стандартной регистрации с частотой 40 Гц применение этого подхода позволяет определить момент вступления продольных волн. Проиллюстрируем этот вывод на примере данных, отраженных на рис. 8. Для примера были взяты данные регионального сейсмического каталога Научной станции РАН (<https://doi.org/10.7914/SN/KN>). На рис. 8 а приведен фрагмент записи сейсмического события со станции KNDC $R = 17.15$ км, $M = 2.9$ (Z-компонента).

Время вступления высокочастотного сигнала $a_3 = 11.6278$ с отличается от визуально определяемого момента времени, который отмечен на рис. 8 темным квадратиком. Это связано с тем обстоятельством, что продольные волны, приходящие прежде других, обладают более высокочастотным спектром, что и обуславливает ограничение к применению данного подхода. Иначе говоря, применение данного подхода ограничено шагом дискретизации. Этот параметр должен быть таким, который позволил бы надежно выделять высокочастотную часть спектра сигналов на фоне помех.

Выводы

Близкие по расположению, локальные землетрясения образуют группы сейсмических волн, которые, распространяясь в волновом поле, накладываются друг на друга и регистрируются в виде сложного волнового пакета (см. рис. 1). При изучении таких волновых пакетов очень важно определить моменты первых вступлений фаз сейсмических волн. Применение анализа фазовых характеристик к определению моментов прихода сейсмических волн от землетрясений на близких расстояниях позволило дифференцировать

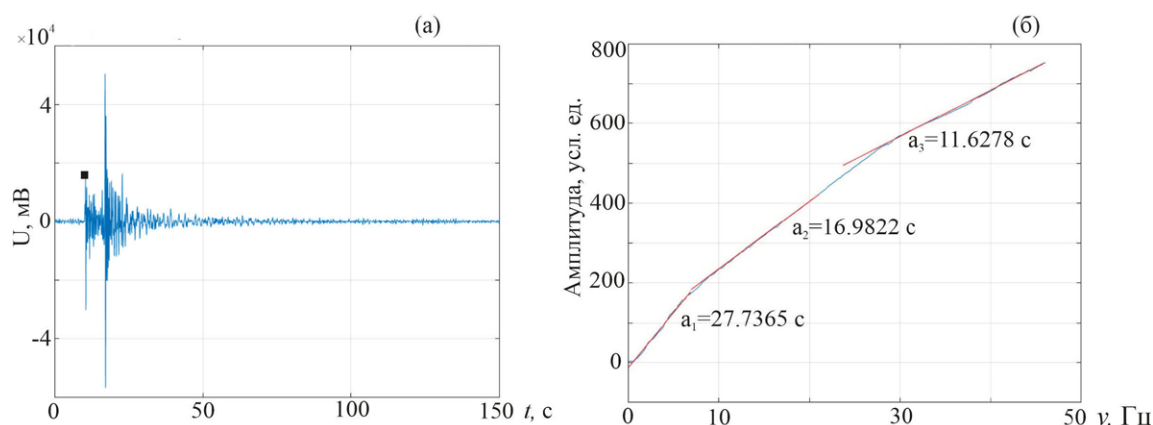


Рис. 8. Фрагмент записи сигналов с шагом дискретизации $\Delta t = 0.025$ с (а); результат обработки сигнала, представленного на рис. 8 а, по определению моментов вступления волновых пакетов (б). a_1 , a_2 , a_3 – время начала низкочастотного, среднечастотного и высокочастотного сигналов соответственно.

Fig. 8. The fragment of signal recording with a sampling step $\Delta t = 0.025$ s (a); the result of signal processing shown in fig. 8 a, of determining the arrival times of wave packets (b). a_1 , a_2 , and a_3 indicate the arrival time of low-frequency, mid-frequency, and high-frequency signals, respectively.

сигналы продольных, поперечных, поверхностных волн и определить моменты времени их вступления. Для применения изложенного подхода к обработке сейсмических данных необходимо уменьшение шага дискретизации при регистрации сигналов регистрирующей аппаратурой ее полосой пропускания.

Список литературы

1. Эйби Дж.А. **1982**. *Землетрясения*: пер. с англ. М.: Недра, 209 с.
2. Морозов А.Н., Ваганова Н.В. **2022**. *Руководство по обработке локальных и региональных землетрясений западной части Евразийской Арктики*. Архангельск: ФИЦКИА УрО РАН, 65 с.
3. Хритова М.А., Гилева Н.А. **2012**. Автоматическая обработка региональных землетрясений Прибайкалья и Забайкалья. *Сейсмические приборы*, 48(2): 15–27. EDN: RANAYL
4. Шулаков Д.Ю. **2014**. Развитие системы сейсмического мониторинга г. Березники. В кн.: *Современные методы обработки и интерпретации сейсмических данных: Материалы Девятой Междунар. сейсмол. школы*. Обнинск: ГС РАН, с. 358–361.
5. Freiberger W.F. **1963**. An approximate method in signal detection. *Quarterly of Applied Mathematics*, 20: 373–378.
6. Kaveh M.S., Mansouri R., Keshavarz A. **2019**. Automatic P-wave picking using undecimated wavelet transform. *Journal of Seismology*, 23: 1031–1046. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09852-z>
7. Jiang W., Ding W., Zhu X., Hou F. **2022**. A recognition algorithm of seismic signals based on wavelet analysis. *Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse10081093>
8. Рыбин А.К., Нигматуллин Р.Р., Непейна К.С., Казначеев П.А., Александров П.Н. **2019**. Аналитическое описание сейсмических сигналов методом фрактального неортогонального амплитудно-частотного анализа // *Вестник КРАУНЦ. Науки о земле*, 1(41): 15–24. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-15-24>
9. Любушин А.А. **2009**. Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм. *Физика Земли*, 5: 15–28. EDN: KAVJQX
10. Долгополов Б.К., Сычев В.Н., Имашев С.А. **2017**. Методика мультифрактального анализа сигнала на примере сейсмического шума. *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*, 1: 9–14.
11. Сычев В.Н., Имашев С.А. **2017**. Оценка параметра Херста сейсмического сигнала. *Геосистемы переходных зон*, 1(2): 50–61. doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.2.050-061

12. Барышников Н.В., Абзалилов И.А., Турунтаев С.Б. **2023**. Применение синтетических волновых форм для создания модели глубокого машинного обучения с целью выделения первых вступлений на сейсмических записях. *Динамические процессы в геосферах*, 15(3): 38–53. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_3_38; EDN: MKVKVI
13. Давыдов А.Б., Шемаров А.И. **2011**. Детектор для обнаружения момента вступления сейсмической волны. *Доклады БГУИР*, 55(1): 23–30.
14. Имашев С.А., Аладьев А.В. **2024**. Обнаружение сейсмических событий на основе искусственной нейронной сети SeisDetNet. Ч. 1. Архитектура нейронной сети. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 4(64): 59–69. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-4-64-59-70>
15. Имашев С.А., Аладьев А.В. **2025**. Обнаружение сейсмических событий на основе искусственной нейронной сети SeisDetNet. Ч. 2. Апробация модели. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(65): 28–37. [doi:10.31431/1816-5524-2025-1-65-28-3728](https://doi.org/10.31431/1816-5524-2025-1-65-28-3728); EDN: ULKINP
16. Корн Г.А., Корн Т.М. **1973**. *Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы*. М.: Наука, с. 700–720.
17. Уайт Дж.Э. **1986**. *Возбуждение и распространение сейсмических волн*: пер. с англ. М.: Недра, 257 с.
18. Непейна К.С., Казначеев П.А., Александров П.Н. **2019**. Сейсмический мониторинг современных геодинамических процессов с использованием градиентной установки. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 4(44): 84–92. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-84-92>
19. Казначеев П.А., Матюков В.Е., Александров П.Н., Непейна К.С. **2019**. Разработка трехкомпонентной градиентной установки для регистрации сейсмоакустического поля в геодинамически активных регионах. *Сейсмические приборы*, 55(1): 46–58. <https://doi.org/10.21455/si2019.1-3>

References

1. Eiby G.A. **1980**. *Eartquakes*. London: Heinemann, 209 p.
2. Morozov A.N., Vaganova N.V. **2022**. *Guidelines for processing local and regional earthquakes of the Western Eurasian Arctic*. Arkhangel'sk: FITSKIA UrO RAN, 95 p. (In Russ.).
3. Khritova M.A., Gilyova N.A. **2013**. Automated processing of regional earthquakes in Cisbaikalia and Transbaikalia. *Seismic Instruments*, 49(1): 53–63. <https://doi.org/10.3103/s0747923913010052>
4. Shulakov D.Yu. **2014**. Development of the seismological monitoring system in the city of Berezniki. In: *Modern methods of processing and interpretation of seismological data: Materials of the Ninth International*

- Seismological Workshop, September 8–12, 2014*. Obninsk: GS RAS, p. 358–361. (In Russ.).
5. Freiburger W.F. **1963**. An approximate method in signal detection. *Quarterly of Applied Mathematics*, 20: 373–378.
 6. Kaveh M.S., Mansouri R., Keshavarz A. **2019**. Automatic P-wave picking using undecimated wavelet transform. *Journal of Seismology*, 23: 1031–1046. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09852-z>
 7. Jiang W., Ding W., Zhu X., Hou F. **2022**. A recognition algorithm of seismic signals based on wavelet analysis. *Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse10081093>
 8. Rybin A.K., Nigmatullin R.R., Nepeina K.S., Kaznacheev P.A., Aleksandrov P.N. Analytical description of the seismic signals based on the nonorthogonal amplitude-frequency analysis of the smoothed signals. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(41): 15–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-15-24>
 9. Lyubushin A.A. Synchronization trends and rhythms of multifractal parameters of the field of low-frequency microseisms. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 45(5): 381–394. <https://doi.org/10.1134/s1069351309050024>
 10. Dolgoplov B.K., Sychev V.N., Imashev S.A. **2017**. [Methodology of multifractal signal analysis using seismic noise as an example]. [*Science, new technologies and innovations of Kyrgyzstan*], 1: 9–14. (In Russ.).
 11. Sychev V.N., Imashev S.A. **2017**. Estimation of Hurst exponent of seismic signal. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 1(2): 50–61. (In Russ.). doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.2.050-061
 12. Baryshnikov N.A., Abzalilov I.A., Turuntaev S.B. **2023**. Application of synthetic waveforms for creating a deep learning model for identifying first arrivals in seismic records. *Dynamic Processes in Geospheres*, 15(3): 38–53. (In Russ.). http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_3_38
 13. Davydov A.B., Shemarov A.I. **2011**. [Detector to detecting the moment of seismic wave entry]. *Doklady BGUIR*, 55(1): 23–30. (In Russ.).
 14. Imashev S.A., Aladev A.V. **2024**. SeisDetNet: Artificial neural network for seismic event detection. Part 1: Architecture. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 4(64): 59–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-4-64-59-70>
 15. Imashev S.A., Aladev A.V. **2025**. SeisDetNet: artificial neural network for seismic event detection. Part 2: Model assessment. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Earth Sciences Bulletin of KRAESC*, 1(65): 28–37. (In Russ.).
 16. Korn G.A., Korn T.M. **1968**. *Mathematical handbook for scientists and engineers: Definitions, theorems, and formulas for reference and review*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1130 p.
 17. White J.E. **1983**. *Underground sound. Application of seismic waves*. Amsterdam; Oxford; New York, 257 p. (Methods in geochemistry and geophysics; 18).
 18. Nepeina K.S., Kaznacheev P.A., Aleksandrov P.N. **2019**. Seismic monitoring of modern geodynamic processes using a gradient system. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 4(44): 84–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-84-92>
 19. Kaznacheev P.A., Matiukov V.E., Aleksandrov P.N., Nepeina K.S. Development of three-axis gradient system for seismoacoustic data acquisition in geodynamically active regions. *Seismic instruments*, 55: 535–543. <https://doi.org/10.3103/s0747923919050062>

Об авторах

Александров Павел Николаевич (<https://orcid.org/0009-0008-6895-5811>), доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ЦГЭМИ ИФЗ РАН), Москва, Россия, alexandr@igemi.troitsk.ru

Стасенко Лия Вячеславовна (<https://orcid.org/0009-0000-2458-5152>), инженер ЛПАР, Научная станция Российской академии наук (НС РАН) в г. Бишкек, Киргизия.

About the Authors

Aleksandrov, Pavel N. (<https://orcid.org/0009-0008-6895-5811>), Doctor of Physics and Mathematics, Principal Researcher, Geoelectromagnetic Research Centre of the Schmidt Institute of the Earth of RAS, Moscow, Troitsk, Russia

Stasenko, Liya V. (<https://orcid.org/0009-0000-2458-5152>), Engineer, Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyz Republic

Поступила 23.05.2025

Принята к публикации 25.06.2025

Received 23 May 2025

Accepted 25 June 2025

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



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

УДК 532.5.031+550.344.42+551.466.62

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.0.wif-2;>
<https://elibrary.ru/loobrn>
<http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-0-2.pdf> (In Russian)
Published online 10.07.2025

Waves in a fluid layer excited by pressure variations above the free surface

Yury P. Korolev

E-mail: Yu_P_K@mail.ru

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

Abstract. The aim of the paper was to study the problem of waves in a layer of incompressible fluid of constant depth. The interest in the problem arose due to the excitation and propagation of surface waves in the Pacific Ocean as a result of the powerful explosive eruption of the Hunga Tonga–Hunga Haapai volcano on January 15, 2022. Potential fluid motions were considered. The disturbances were induced in the form of a short-term pressure pulse above the free surface and in the form of pressure waves arising due to the disintegration of the initial region of high pressure in the atmosphere (Lamb waves). Solutions were obtained for forced and free waves on the surface, as well as for forced and free pressure waves at the bottom of the fluid layer. In the long-wave approximation, the amplitudes of free surface waves and the amplitudes of free bottom pressure waves (in meters of water column) coincide, while the amplitudes of forced bottom pressure waves are greater than the amplitudes of forced surface waves. In cases where only the forced component is present in the pressure record, the use of a correction factor gives an adequate result for surface waves. If both components (forced and free) are present in the record, the use of the correction factor is unjustified, since it is impossible to separate the components. The estimation of surface wave amplitudes based on bottom pressure data may yield inadequate results. The results obtained are discussed in connection with the operational tsunami forecast based on the data from bottom sea level measurement stations. A proposal is formulated on a possible method for adequately estimating the amplitude of surface waves when excited by a moving region of variable pressure.

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

Волны в слое жидкости, возбуждаемые вариациями давления над свободной поверхностью

Ю. П. Королёв

E-mail: Yu_P_K@mail.ru

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

Резюме. Целью работы являлось исследование задачи о волнах в слое несжимаемой жидкости постоянной глубины. Интерес к задаче возник в связи с возбуждением и распространением поверхностных волн в Тихом океане в результате мощного взрывного извержения вулкана Хунга Тонга–Хунга Хаапай 15.01.2022. Рассматривались потенциальные движения жидкости. Возмущения задавались в виде кратковременного импульса давления над свободной поверхностью и в виде волн давления, возникающих в результате распада начальной области повышенного давления в атмосфере (волн Лэмба). Получены решения для вынужденных и свободных волн на поверхности, а также вынужденных и свободных волн давления на дне слоя жидкости. В приближении длинных волн амплитуды свободных поверхностных волн и амплитуды свободных волн

The translation from Russian: Королёв Ю.П. Волны в слое жидкости, возбуждаемые вариациями давления над свободной поверхностью. [Электронный ресурс]. Геосистемы переходных зон, 2025, т. 9, № 3. URL: <http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-0-2.pdf>.
Translated by Yury P. Korolev.

придонного давления (в метрах водяного столба) совпадают, в то время как амплитуды вынужденных волн придонного давления выше амплитуд вынужденных поверхностных волн. В случаях, когда в записи давления присутствует только вынужденная составляющая, применение корректирующего множителя даст адекватный результат для поверхностных волн. Если в записи присутствуют обе компоненты (вынужденная и свободная), применение поправочного коэффициента неправомерно, поскольку разделить составляющие невозможно. Оценка амплитуд поверхностных волн по данным о давлении на дне может давать неадекватный результат. Полученные результаты обсуждаются в связи с оперативным прогнозом цунами по данным донных станций измерения уровня океана. Сформулировано предложение о возможном способе адекватной оценки амплитуды поверхностных волн при возбуждении их движущейся областью переменного давления.

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

For citation: Korolev Yu.P. Waves in a fluid layer excited by pressure variations above the free surface. *Geosistemy perexodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 3, pp. 277–285. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.0.wif-2>; <https://elibrary.ru/loobm>

Для цитирования: Королёв Ю.П. Волны в слое жидкости, возбуждаемые вариациями давления над свободной поверхностью. [Электронный ресурс]. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 3. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.0.wif-2>; URL: <http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-0-2.pdf>

Introduction

The powerful explosive eruption of the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano in the South Pacific Ocean on January 15, 2022¹, is estimated to be the largest underwater volcanic eruption in almost a century and a half since the catastrophic destruction of Krakatoa in 1883 [1]. The effects of the explosion were observed in all environments: the ionosphere, the atmosphere, the ocean and its surface, and the earth’s crust [2–6].

The tsunami generated by the volcanic eruption caused catastrophic floods the nearby islands of the Tonga archipelago with a maximum height of up to 22 m. The tsunami caused damage not only to the nearby island states, but also to the countries of the Pacific coast. Flood heights of up to 1.3 m were recorded in Japan, over 3.5 m in California, about 1 m in Chile and up to 1 m in Peru (<https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search>).

The volcanic explosion produced a high-pressure wave in the atmosphere (also called a Lamb wave), which was recorded by many ground-based

barographs around the globe. The high-pressure wave, propagating at a speed close to the speed of sound in the atmosphere, caused disturbances in the free surface of the ocean in the form of a forced wave moving at the same speed. Such a wave is called a baric wave below. A rapid (explosive) change in atmospheric pressure is itself a source of gravity waves on the water surface. Other processes in the eruption center, leading to changes in the water surface level, are also sources of gravity (free) waves in the ocean, propagating at the speed of long waves. In any case, surface waves are a superposition of baric and gravity waves after the latter arrive at the observation point. Baric and/or gravity waves have been recorded by many deep-sea bottom stations of the DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)² system in the Pacific Ocean³. Both waves, baric and gravity, have been recorded in their entirety, from the moment of arrival of the baric wave, by a small number of DART stations. The amplitudes of the baric and gravity waves are comparable even at large distances from the eruption. The change in the amplitude of baric waves is inversely proportional to the square root of the distance from the source [7],

¹ NOAA National Centers for Environmental Information. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search> (accessed 08.06.2025).

² NOAA Center for Tsunami Research: DART. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart> (accessed 08.06.2025).

³ National Data Buoy Center. URL: https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml (accessed 08.06.2025).

as is the change in the amplitude of gravity waves. Waves of this type, cylindrical waves, described in the space of two variables, have a leading edge but no trailing edge, and the oscillations behind the front continue for quite a long time [8]. Although the gravity wave lags noticeably behind the baric wave, with its arrival a superposition of the gravity and barometric waves occurs.

Various phenomena in the atmosphere, on the surface and on the ocean floor that accompanied the volcanic explosion are considered in numerous works. In work [9], the processes that occurred in the source were discussed. It was assumed that five explosions of varying intensity occurred in the area of the volcano within half an hour to an hour. Pressure waves in the atmosphere based on natural data were analyzed in works [3, 10]. In article [7], data from many ground-based barographs were analyzed, it was established that the pressure wave in the atmosphere (Lamb wave) propagated at a speed of 317 m/s, its amplitude decreased with distance from the explosion as $r^{-1/2}$, and numerical modeling of pressure waves was performed based on a specially constructed source. A close estimate of the propagation speed of the Lamb wave of 312 m/s was obtained in [11]. The influence of atmospheric pressure waves on the generation of waves on the ocean surface based on numerical modeling is considered in [4, 7, 12–17], as well as on the website of the NOAA Center for Tsunami Research⁴. In [4], differences in the amplitudes of bottom pressure waves and surface waves were noted. The generation of gravity waves as a result of disturbances of the water surface at the source in a numerical model is considered in [7, 18, 19]. The parameters of the disturbance sources were selected based on the degree of coincidence of the shapes of the computed and recorded waves in the ocean.

Most of the listed works devoted to the event on January 15, 2022 were the result of either numerical experiments or analysis of processes in the source.

Waves from a moving region of increased atmospheric pressure in the “shallow water” approximation were considered in [20]. When such regions propagate at a speed significantly lower than the speed of long waves in the open ocean, the Proudman resonance can only occur in shallow water, when the speed of long waves approaches the speed of the baric disturbance [21]. In contrast, Lamb waves propagate at a speed close to the speed of sound in air. Resonance can occur in areas of deep-water, but rather narrow trenches, the speed of long waves over which exceeds the speed of the Lamb wave. For example, the Mariana Trench, with a maximum depth of about 11 km, has an average width of 69 km (https://en.wikipedia.org/wiki/Mariana_Trench). The influence of such depressions on the propagation of free and forced waves on the ocean surface has not been studied.

In [22], solutions are given to problems of excitation of surface waves from short-term pressure action on a free surface, and of excitation of waves by a moving area of increased pressure, which can result in the occurrence of meteotsunamis. The forms of surface waves and bottom pressure waves were analyzed. The differences between variations in bottom pressure and variations in the free surface were discussed.

The problem of waves excited by a high-pressure region moving at a constant velocity in a one-dimensional formulation is considered in [6, 11, 23], and in a two-dimensional formulation in [23]. The moving region excites forced waves on the free surface and on the bottom. It is shown that the amplitudes of the bottom pressure waves are greater than the amplitudes of the forcing pressure above the free surface, the amplitudes of the bottom pressure waves, expressed in meters of water column, are higher than the amplitudes of the surface waves. The works [17, 23] describe the correction of data on bottom pressure variations for estimating the shape of forced waves. Estimates of free waves were not considered.

⁴ 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 08.06.2025).

Data on the bottom pressure of the deep-ocean stations closest to the source are used in operational tsunami forecasting by the current NOAA method⁵, the express method [24], to estimate the waveform of the expected tsunami at more remote points and near the coast. As shown on the NOAA Center for Tsunami Research website, overestimated amplitudes of surface wave based on bottom pressure data can be the cause of an inadequate determination of the degree of danger of the predicted tsunami.

The objective of the work is to study the solution of the problem of waves in a liquid layer generated by atmospheric pressure disturbances. Waves on the liquid surface and bottom pressure waves arising under the action of traveling atmospheric pressure waves (Lamb waves) are considered. The problem is of interest in connection with the use of ocean bottom pressure data in operational tsunami forecasting.

Statement of the problem

We consider the classical problem of potential motion in a layer of heavy liquid of depth H lying on a solid foundation [8]. The problem is solved in the space of three variables, the Oz axis with the origin on the free surface is directed vertically upward, the Ox and Oy axes are on the free surface. The acceleration of gravity g is directed downward.

The velocity potential φ in the liquid layer satisfies the equation

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

For liquids, the Bernoulli equation is valid

$$\frac{d^2 \varphi}{dz^2} - \xi^2 \varphi = 0,$$

where ρ is the density of the liquid (water), p_a is the atmospheric pressure, p is the pressure in the liquid layer.

In the linear approximation, the boundary conditions for (1) are on the disturbed free surface $z = \zeta$ (the values of the variables φ and p are related to $z = 0$):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (2)$$

and

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + g\zeta = \frac{p_a}{\rho}; \quad (3)$$

$$\text{at the bottom } (z = -H) \quad \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

In this paper, the disturbance is specified by the pressure above the free surface $p = p_0 + p_a$, including some axially symmetric disturbance $p_0(r, t)$. Also, for generality, an axially symmetric initial elevation of the free surface can be specified, caused by another possible generation mechanism, not necessarily associated with pressure changes. Due to the linearity of the problem, the waves excited by these sources do not affect each other.

The pressure at the bottom ($z = -H$) is determined from the Bernoulli equation using the found φ :

$$p = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} + p_a + \rho g H = p_{\text{bott}} + p_a + \rho g H, \quad (5)$$

where p_{bott} are the variations in pressure at the bottom.

Problem (1)–(4) in cylindrical coordinates is solved by one of the common methods – by using the integral Laplace transform with respect to

time ($f(s) = \int_0^\infty f(t) \cdot e^{-st} dt$) and the Fourier–Bessel transform ($f(\xi) = \int_0^\infty f(r) \cdot J_0(\xi r) r dr$) with respect to the radial coordinate [25].

The solution is presented in the form of Fourier–Bessel transform images. This is sufficient for a comparative analysis of waves on a free surface and waves on the bottom.

The solution is presented in the form of Fourier–Bessel transform images. This is sufficient for a comparative analysis of waves on a free surface and waves on the bottom.

⁵ NOAA Center for Tsunami Research: Tsunami Forecasting. URL: <https://nctr.pmel.noaa.gov/tsunami-forecast.html> (accessed 08.06.2025).

Results and discussion

Waves excited by a short-term pressure pulse above the free surface

The initial condition for problem (1)–(4) is the elevation of the free surface $\zeta(t=0, r) = \zeta_0(r/R_1)$ inside the circle $r < R_1$, ($r^2 = x^2 + y^2$). The pressure disturbance above the free surface is given by a short-term axially symmetric pressure pulse in the circle $r < R$: $p_0 = p_0(r/R) \delta(t/T)$, where $\delta(t/T)$ is the Dirac δ -function.

After integral transformations, system (1)–(4) is represented as

$$\frac{d^2 \varphi}{dz^2} - \xi^2 \varphi = 0. \quad (1.1)$$

Boundary conditions:
at $z = 0$

$$s\zeta - Z_0 = \frac{d\varphi}{dz}, \quad (2.1)$$

$$s\varphi + \frac{P_0 T}{\rho} + g\zeta = 0; \quad (3.1)$$

at $z = -H$

$$\frac{d\varphi}{dz} = 0. \quad (4.1)$$

Initial condition:

$$Z_0 = \int_0^{R_1} \zeta_0(r/R_1) \cdot J_0(\xi r) \cdot r dr, \quad \varphi(t=0) = 0.$$

$P_0 T$ in (3.1) is defined as

$$P_0 T = \int_0^\infty \int_0^R p_0(r/R) \cdot \delta(t/T) \cdot e^{-st} \cdot J_0(\xi r) \cdot dt \cdot r dr = \\ = T \int_0^R p_0(r/R) \cdot J_0(\xi r) \cdot r dr.$$

In the system (1.1)–(4.1) all variables are images of integral transformations. Below, the arguments of the function (s and/or ξ) indicate the image of which transformation this function is.

The solution to (1.1) is $\varphi = A_1 e^{\xi z} + A_2 e^{-\xi z}$. The unknown coefficients A_1 and A_2 , as well as $\zeta(s, \xi)$ are found from the solution of the system (2.1)–(4.1) taking into account the pressure disturbance and the initial elevation of the free surface.

$$\varphi(z, s, \xi) = -\frac{P_0 T}{\rho} \frac{ch\xi(z+H)}{ch\xi H} \frac{s}{s^2 + \Omega^2} - \\ - gZ_0 \frac{ch\xi(z+H)}{ch\xi H} \frac{1}{s^2 + \Omega^2};$$

$$\zeta(s, \xi) = -\frac{P_0 T}{\rho g} \frac{\Omega^2}{s^2 + \Omega^2} + Z_0 \frac{s}{s^2 + \Omega^2}.$$

The variations in pressure at the bottom are found from (5):

$$p_{\text{bot}}(z = -H, s, \xi) = \frac{P_0 T}{ch\xi H} \frac{s^2}{s^2 + \Omega^2} + \frac{\rho g Z_0}{ch\xi H} \frac{s}{s^2 + \Omega^2} = \\ = \frac{P_0 T}{ch\xi H} \left(1 - \frac{\Omega^2}{s^2 + \Omega^2} \right) + \frac{\rho g Z_0}{ch\xi H} \frac{s}{s^2 + \Omega^2},$$

where $\Omega^2 = g\xi \cdot th\xi H$.

The presented expressions have 2 poles: $s = \pm i\Omega$, corresponding to free waves.

The inverse Laplace transform gives:

$$\zeta(t, \xi) = -\frac{P_0}{\rho g} \Omega T \sin \Omega t + Z_0 \cos \Omega t,$$

$$p_{\text{bot}}(-H, t, \xi) = \frac{P_0}{ch\xi H} \delta(t/T) - \\ - \frac{P_0}{ch\xi H} \Omega T \sin \Omega t + \frac{\rho g Z_0}{ch\xi H} \cos \Omega t.$$

The solutions coincide with the result obtained in a slightly different way in [22]. The wave components coincide with an accuracy of a dimensional factor.

In the approximation of long waves ($\xi H \ll 1$, $ch\xi H \approx 1$, $\Omega^2 \approx gH\xi^2$) the obtained solutions are transformed into the following expressions.

Wave form of the free surface:

$$\zeta(t, \xi) = -\frac{P_0 T}{\rho g} \sqrt{gH} \xi \sin \sqrt{gH} t \xi + Z_0 \cos \sqrt{gH} t \xi,$$

where the first term describes the wave from the pressure pulse, the second one – the wave from the initial elevation of the free surface.

Pressure variations at the bottom, recorded by bottom stations, reduced to meters of water column:

$$\eta_{\text{bott}}(-H, t, \xi) = \frac{p_{\text{bott}}(-H, t, \xi)}{\rho g} = \frac{P_0}{\rho g} \cdot \delta(t/T) - \frac{P_0 T}{\rho g} \cdot \sqrt{gH} \xi \sin \sqrt{gH} t \xi + Z_0 \cos \sqrt{gH} t \xi.$$

Here the first term describes the reaction of the bottom pressure to the pressure impulse above the free surface, the second and third are similar to the terms from the previous expression.

In the obtained expressions, the wave components are identical. This allows us to quite reasonably estimate the shape (its long-wave component) of the ocean surface based on the bottom pressure data obtained by deep-sea stations in the ocean (https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml).

**Waves generated
by a diverging concentric wave
of increased pressure
above the free surface**

Of interest is the problem of waves in a liquid generated by a traveling wave of increased pressure above the free surface, excited by the disintegration of an instantaneous increase in pressure in a limited circular region. According to observations, such a wave (Lamb wave) propagates at a speed close to the speed of sound in air, the amplitude attenuates with distance from the center of disturbance as $r^{-1/2}$ [1].

The formulation of the problem of waves on the surface of a liquid layer excited by such a wave coincides with the statement of problem (1)–(4), or (1.1)–(4.1) in the images of integral transformations. A wave in the atmosphere arises as a result of the disintegration of an initial region of high pressure in a circle $r < R$: $p_0 = p_0(r/R)$, which Fourier–Bessel image is

$P_0 = \int_0^R p_0(r/R) \cdot J_0(\xi r) \cdot r dr$. A wave from such a disturbance over a free surface in the images of integral transformations is described as $p_{\text{forcing}} = P_0 s / (s^2 + U^2 \xi^2)$. The wave front propagates with the velocity U , the amplitude asymptotically decays with distance as $r^{-1/2}$ [26]. The initial

pressure pulse excites free waves, which front moves with the velocity of long waves. And the high-pressure wave gives rise to forced waves on the free surface, propagating with the velocity U . In equation (3.1), $P_0 T$ should be replaced by $P_0 s / (s^2 + U^2 \xi^2)$.

Besides, an additional initial condition is the elevation of the free surface $\zeta(t=0, r) = \zeta_0(r/R_1)$ inside the circle $r < R_1$, ($r^2 = x^2 + y^2$).

The solution to the problem in the images of integral transforms is represented by expressions for variations in the forcing pressure above the free surface $p_{\text{forcing}}(s, \xi) = P_0 s / (s^2 + U^2 \xi^2)$, variations in the pressure at the bottom

$$p_{\text{bott}}(z = -H, s, \xi) = \frac{P_0}{ch \xi H} \frac{s}{s^2 + U^2 \xi^2} \frac{s^2}{s^2 + \Omega^2} + \frac{\rho g Z_0}{ch \xi H} \frac{s}{s^2 + \Omega^2} \text{ and the shape of the free surface}$$

$$\zeta(s, \xi) = -\frac{P_0}{\rho g} \frac{s}{s^2 + U^2 \xi^2} \frac{\Omega^2}{s^2 + \Omega^2} + Z_0 \frac{s}{s^2 + \Omega^2}.$$

The last two expressions have 4 poles: $s = \pm iU\xi$, corresponding to forced waves, and $s = \pm i\Omega$, corresponding to free waves.

The inverse Laplace transform in the long-wave approximation ($\xi H \ll 1$, $\Omega \approx (gH)^{1/2} \xi$, $ch \xi H \approx 1$) yields the following expressions:

for the variations in the forcing pressure above the free surface (pressure is expressed in meters of water column)

$$\eta_{\text{forcing}}(t, \xi) = \frac{p_{\text{forcing}}(0, t, \xi)}{\rho g} = \frac{P_0}{\rho g} \cdot \cos Ut \xi, \quad (6)$$

for the variations in the bottom pressure (in meters of water column)

$$\eta_{\text{bott}}(-H, t, \xi) = \frac{p_{\text{bott}}(-H, t, \xi)}{\rho g} = \frac{P_0}{\rho g} \cdot \frac{U^2}{U^2 - gH} \cos Ut \xi - \frac{P_0}{\rho g} \cdot \frac{gH}{U^2 - gH} \cos \sqrt{gH} t \xi + Z_0 \cos \sqrt{gH} t \xi \quad (7)$$

and for the shape of the free surface

$$\zeta(t, \xi) = \frac{P_0}{\rho g} \cdot \frac{gH}{U^2 - gH} \cos Ut\xi - \frac{P_0}{\rho g} \cdot \frac{gH}{U^2 - gH} \cos \sqrt{gH}t\xi + Z_0 \cos \sqrt{gH}t\xi. \quad (8)$$

In the obtained expressions (7) and (8), the first terms on the right-hand side describe forced waves propagating with the velocity U , the second and third terms describe free (gravity) waves excited by the initial pressure jump and the initial elevation of the free surface, moving with the velocity of long waves $(gH)^{1/2}$. To represent the expressions in spatial variables, the inverse Fourier–Bessel transform should be performed over them.

For example, $\eta(t, r) = \frac{P_0}{\rho g} \int_0^\infty \cos Ut\xi \cdot J_0(r\xi) \xi d\xi$.

Due to the known asymptotics of the Bessel

function $J_0(r\xi) = \sqrt{\frac{2}{\pi r\xi}} \cos(r\xi - \frac{\pi}{4})$, the asymp-

totic estimate of the corresponding integrals will give the attenuation of the amplitudes as $r^{-1/2}$ [26].

From the comparison of (6)–(8) it is evident that the amplitude of the forced bottom pressure waves is greater than the amplitude of the forcing pressure by a factor of $U^2/(U^2 - gH)$, the amplitude of the baric wave differs from the amplitude of the forcing pressure in meters of water column by a factor of $gH/(U^2 - gH)$, and the amplitude of the forced bottom pressure waves is greater than the amplitude of the forced surface (baric) waves by a factor of U^2/gH . The result coincides with the conclusions of works [6, 11, 17, 23] described in the Introduction. The expressions describing the free waves are identical.

To estimate the variations in pressure above the free surface, the data from deep-sea bottom stations should be multiplied by the correction factor $(U^2 - gH)/U^2$. This is confirmed in works [6, 11] based on the measurement data. To estimate the amplitude of forced surface (baric) waves based on bottom station data expressed in meters of water column, another correction factor gH/U^2 should be used [17]. At a velocity of $U = 317$ m/s [7] and an average ocean depth of $H = 4000$ m, the correction factors are 0.6 and 0.4, respectively.

Using the correction factor based on bottom station data, only the amplitudes of forced waves can be adequately estimated; applying any correction factors to the superposition of forced and free waves is unjustified, since it is impossible to separate forced and free waves.

For this reason, one should be cautious in identifying the shape of the water surface based on bottom pressure variations in cases where the bottom pressure information contains data on forced waves. Such cases may be events similar to the event of 15.01.2022, or events associated with the passage of cyclones and typhoons over the ocean, accompanied by the excitation of me-teotsunamis [22].

The results of solving the problem are of practical importance. Data on bottom pressure variations (7) of deep-ocean stations closest to the disturbance source are used in operational tsunami forecasting. The discrepancy between (7) and (8) may lead to an inadequate assessment of the degree of danger of the predicted tsunami. The question of how adequate the assessment of the amplitude of surface waves based on bottom pressure data is posed in [27].

Expression (7) for bottom pressure variations can be written as

$$\eta_{\text{bott}}(-H, t, \xi) = \frac{P_0}{\rho g} \cos Ut\xi + \frac{P_0}{\rho g} \cdot \frac{gH}{U^2 - gH} \cos Ut\xi - \frac{P_0}{\rho g} \cdot \frac{gH}{U^2 - gH} \cos \sqrt{gH}t\xi + Z_0 \cos \sqrt{gH}t\xi \quad (9)$$

The first term in the obtained expression, as expected, coincides with the expression for the forcing pressure (6), the others coincide with the expressions for the shapes of surface, forced and free waves (8). From this representation of the solution for the variations in bottom pressure (9) it follows that it is possible to obtain the true shape of the free surface from the data on the bottom pressure only if the pressure above the free surface is known. Having data on the atmospheric pressure $\eta_{\text{forcing}}(t)$ (6) and subtracting them from the data obtained by the bottom sensors $\eta_{\text{bott}}(t)$ (7), we can obtain the shape of the free surface $\zeta(t)$ (8). The shape of the gravitational component of surface waves can be estimated if we subtract the data on the atmospheric pressure (6) from

the data on the bottom pressure (7), multiplied by $(U^2 - gH)/U^2$.

Atmospheric pressure above a free surface (in a Lamb wave) can be calculated, for example, using a method based on the algorithms of the express method of operational tsunami forecasting, based on the fundamental principle of reciprocity [24]. To forecast pressure variations at remote points, data on atmospheric pressure of barographs closest to the source of increased pressure can be used.

Conclusion

A solution to the problem of waves in a heavy incompressible fluid layer of constant depth is presented.

A localized short-term increase in pressure above the free surface was specified as a wave source. This results in free waves on the surface and pressure waves on the bottom. The shapes and amplitudes of surface waves and bottom pressure waves (in meters of water column) are the same.

Another wave source was an instantaneous increase in pressure in a localized region and a pressure wave propagating in the atmosphere above the free surface, which occurs as a result of the disintegration of a high-pressure region (the Lamb wave model). Such a source excites free waves on the surface of the layer and on the bottom, traveling at the speed of long waves, and forced waves propagating at the speed of a forcing pressure wave. In the long-wave approximation, the shapes and amplitudes of free waves on the surface and on the bottom are the same. The amplitudes of forced bottom pressure waves are higher than the amplitudes of forced surface waves. To estimate the free surface wave shape based on bottom pressure data, the correction factor gH/U^2 can be applied to the part of the record containing only the forced component. This approach is incorrect for data that include both forced and free components.

Overestimated amplitudes of bottom pressure variations can be the cause of inadequate estimation of the expected tsunami by operational forecasting methods that use bottom pressure data. Despite the uniqueness of events like the event of 15.01.2022, tsunami warning services should probably take this feature into account.

A method is proposed for estimating the free surface shape, including forced (baric) and free (gravity) waves, as well as free wave shapes, based on bottom pressure data.

One of the possible methods for calculating the pressure in the Lamb wave is proposed based on the barometric data of stations closest to the source of high pressure, based on the fundamental reciprocity principle.

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. Solovieva M.S., Padokhin A.M., Shalimov S.L. **2022**. Mega-eruption of the Hunga Volcano on January 15, 2022: Detection of ionospheric perturbations by VLF and GNSS radio sounding. *JETP Letters*, 116(11): 846–851.
3. Amores A., Monserrat S., Marcos M., Argüeso D., Villalonga J., Jorda G., Gomis D. **2022**. Numerical simulation of atmospheric Lamb waves generated by the 2022 Hunga–Tonga volcanic eruption. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL098240. <https://doi.org/10.1029/2022GL098240>
4. 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>
5. Matoza R.S., Fee D., Assink J.D., Iezzi A.M., Green D.N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalande J.-M. et al. **2022**. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*, 377(6601): 95–100. <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>
6. 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>
7. 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>
8. Landau L.D., Lifshitz E.M. **1987**. *Course of theoretical physics. Vol. 6. 2nd Engl. ed. Fluid mechanics*. Pergamon Press. (Translation from the Russian).
9. 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>
10. 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>
 11. Nosov M.A., Sementsov K.A., Kolesov S.V., Pryadun V.V. **2022**. Atmospheric Lamb wave manifestation in bottom pressure variations. *Moscow University Physics Bulletin*, 77(6): 896–904.
 12. 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>
 13. 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>
 14. 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>
 15. 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>
 16. 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 Geophysics*, 181: 1793–1809. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03477-1>
 17. Ren Z., Higuera P., Liu P.L.-F. **2023**. On tsunami waves induced by atmospheric pressure shock waves after the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha'apai volcano eruption. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128, e2022JC019166. <https://doi.org/10.1029/2022JC019166>
 18. 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>
 19. 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(2): 675–691. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-675-2023>
 20. Proudman J. **1929**. The effects on the sea of changes in atmospheric pressure. *Geophysical Journal International*, 2: 197–209. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1929.tb05408.x>
 21. Monserrat S., Vilibic I., Rabinovich A.B. **2006**. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(6): 1035–1051. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-1035-2006>
 22. Saito T., Kubota T., Chikasada N. Y., Tanaka Y., Sandanbata O. **2021**. Meteorological tsunami generation due to sea-surface pressure change: Three-dimensional theory and synthetics of ocean-bottom pressure change. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC017011. <https://doi.org/10.1029/2020JC017011>
 23. Liu P.L.-F., Higuera P. **2022**. Water waves generated by moving atmospheric pressure: Theoretical analyses with applications to the 2022 Tonga event. *Journal of Fluid Mechanics*, 951(A34). <https://doi.org/10.1017/jfm.2022.840>
 24. 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>
 25. Lavrent'ev M.A., Shabat B.V. **1973**. [*Methods of complex variable theory*]. Moscow: Nauka, 736 p. (In Russ.).
 26. Stoker J.J. **1957**. *Water waves*. New York, London: Interscience Publ. <https://doi.org/10.1002/9781118033159>
 27. Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. **2025**. 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 perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 9(1): 56–65. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.056-065>; <https://www.elibrary.ru/kktwzl>

About the Author

Korolev, Yuri 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

Об авторе

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

Received 24 April 2025

Accepted 15 June 2025

Поступила 24.04.2025

Принята к публикации 15.06.2025

© 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 528.8

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.286-298>
<https://www.elibrary.ru/fvkynr>

Характеристика древесной растительности лесного биогеоценоза с применением искусственного интеллекта на основе данных дистанционного зондирования

А. В. Косарев[@], И. В. Сергеева, А. В. Ключиков, С. В. Чумакова, А. А. Леонтьев

^{@E-mail:} aleteia@inbox.ru

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

Резюме. Цель работы – на основе данных дистанционного зондирования с применением искусственно-го интеллекта провести ранжирование древесных объектов разной протяженности на территории лесного биогеоценоза. *Материалы и методы.* Объект исследования – памятник природы «Урочище Белый Ключ» Татищевского района Саратовской области. Материалы исследования – мультиканальные спутниковые кос-моснимки в видимом и ближнем ИК-спектральных диапазонах. Обработка материалов и их картографирова-ние реализованы на базе кроссплатформенной системы QGIS (версия 3.28.0). Распознавание объектов био-геоценоза осуществлялось с помощью плагина Mapflow. *Результаты.* Установлена многоярусная структура биогеоценоза. При этом 60–65 % растительных объектов относятся к высокому лесу, 30–35 % – к среднему лесу. Установлены признаки устойчивого развития лесного лиственного биогеоценоза: нечеткость почвенной линии в координатах «зеленость» vs «яркость», NIR–RED преобразования tasseled cap; высокая дисперсия за-висимостей «влажность» vs «яркость»; «зеленость» vs «влажность»; наличие локального участка в верхней части диаграмм главных компонент, в котором их величины изменяются в широком диапазоне; асимметрич-ность и смещенность в сторону больших значений частотных диаграмм влажности, зелености, а также ин-декса EVI. *Обсуждение.* Для лесных массивов структура диаграмм tasseled cap отличается нечетким и рас-плывчатым видом линии почвы, а также концентрацией максимума вегетационной составляющей в опре-деленных областях. Эти признаки объясняются тем, что, в отличие от сельскохозяйственных угодий, в лесу почва скрыта под слоем листвы, опавших листьев и мха, поэтому отраженный сигнал от почвы смешивается с отражением от растительности. Преобладание высокого леса указывает на то, что верхний ярус биогеоце-ноза занимает большую часть территории и является определяющим фактором структуры и функционирова-ния экосистемы. Высокие деревья создают тень, влияют на микроклимат, почвенные условия и доступность света для нижних ярусов.

Ключевые слова: лесной биогеоценоз, дистанционное зондирование, искусственный интеллект, спек-тральное преобразование

Characterization of the woody vegetation of the forest biogeocenosis using artificial intelligence based on remote sensing data

Anton V. Kosarev[@], Irina V. Sergeeva, Arkady V. Klyuchikov, Svetlana V. Chumakova,
Alexei A. Leontiev

^{@E-mail:} aleteia@inbox.ru

Saratov State University of genetics, biotechnology and engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

Abstract. The purpose of the study is to rank woody areas of different lengths within the forest biogeocenosis based on remote sensing data and using artificial intelligence. *Materials and methods.* The object of the study is the “Bely Klyuch” natural landmark of the Tatishchevsky district of the Saratov region. The research materials are multichannel

satellite images in the visible and near-infrared spectral ranges. The processing of materials and their mapping were completed using the cross-platform QGIS system (version 3.28.0). Recognition of biogeocenosis objects was carried out using the Mapflow plugin. *Results.* A multilevel structure of the biogeocenosis has been established. It was found that 60–65 % of woody areas belong to the high forest, and 30–35 % to the medium forest. Signs of sustainable development of the deciduous forest biogeocenosis have been established: indistinctness of the soil line in the coordinates of greenness vs brightness, NIR–RED tasseled cap transformations; high dispersion of dependencies wetness vs brightness; greenness vs wetness; the presence of a local area at the top of the principal component diagrams, in which their values vary over a wide range; asymmetry and skewness towards higher values of frequency diagrams of wetness and greenness, as well as the EVI index. *Discussion.* For forested areas, the structure of the tasseled cap diagrams is characterized by indistinct and blurred soil line, as well as by a concentration of maximum vegetation component in certain areas. The reason for this is that in forests, unlike agricultural lands, the soil is hidden under a layer of foliage, fallen leaves, and moss; therefore, the reflected signal from the soil mixes with the reflection from the vegetation. The predominance of high forest indicates that the upper layer of the biogeocenosis occupies a large part of the territory and is a determining factor in the structure and functioning of the ecosystem. Tall trees create shade, influence the microclimate, soil conditions, and light availability for the lower layers.

Keywords: forest biogeocenosis, remote sensing, artificial intelligence, spectral transformation

Для цитирования: Косарев А.В., Сергеева И.В., Ключиков А.В., Чумакова С.В., Леонтьев А.А. Характеристика древесной растительности лесного биогеоценоза с применением искусственного интеллекта на основе данных дистанционного зондирования. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 3, с. 286–298. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.286-298>; <https://www.elibrary.ru/fvkynr>

For citation: Kosarev A.V., Sergeeva I.V., Klyuchikov A.V., Chumakova S.V., Leontiev A.A. Characterization of the woody vegetation of the forest biogeocenosis using artificial intelligence based on remote sensing data. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 3, pp. 286–298. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.286-298>

Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является современным инструментом, позволяющим проводить комплексную оценку экологического состояния окружающей среды в широком диапазоне пространственных и временных масштабов [1]. Оно применяется в задачах мониторинга антропогенно нарушенных земель [2], изучении зеленых насаждений [3], исследованиях экологического состояния лесных экосистем [4]. Исследование структуры и динамики леса может реализовываться с помощью алгоритмов трехмерного моделирования структуры и динамики леса по данным лазерного сканирования, космосъемки [5]. Широко применяются в задачах лесоведения кроссплатформенные геоинформационные системы, из которых наиболее известна QGIS. К этим задачам относятся оценка влияния лесных пожаров на целостность лесного биогеоценоза [6]; изучение распределения пород деревьев и влияния на него антропогенного фактора [7]; определение типов поверхности, характерных для лесного массива [8]; кадастровая оценка лесных почвенных ресурсов

с учетом состояния почв [9]; оценка содержания почвенного углерода в лесных массивах [10]. Оценка глубины сезонно-талого слоя с применением дистанционного зондирования позволила выявить вытеснение тундры лесом [11]. Определение вегетационных индексов позволяет выявлять очаги размножения вредителей и их влияние на состояние лесного массива, а также устанавливать зоны сухостоя, ослабленных и отмирающих деревьев [12]. Значительную роль в задачах мониторинга лесных хозяйств играет в настоящее время искусственный интеллект [13]. Цифровые решения на его основе применяются для интерпретации данных ДЗЗ [14]. Перспективным подходом в этом направлении является моделирование на основе машинного обучения [15].

Цель работы – на основе данных дистанционного зондирования Земли с применением искусственного интеллекта провести ранжирование древесных объектов по высоте на территории лесного биогеоценоза. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: 1) подбор космоснимков Landsat-9 и картографирование изучаемой местности; 2) преобразование tasseled cap

по данным космоснимков; 3) распознавание лесных насаждений разной высоты, а также дорог на изучаемой территории с помощью искусственного интеллекта.

Материалы и методы

Объектом исследований является лесной биогеоценоз, расположенный на ООПТ «Урочище Белый Ключ» в Татищевском районе Саратовской области (рис. 1). В качестве исходных материалов для задач дистанционного зондирования нами применялись мультиспектральные снимки, полученные спутником Landsat 9. Обработка данных спутникового мониторинга и картографирование материала проводились с помощью программного комплекса QGIS (версия 3.28.0).

Мультиспектральные космоснимки относились к периоду 01.07.2024 – 01.09.2024 гг. (USGS. Science for changing world. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Преобразование изображения tasseled cap представляет собой изменение мультиспектральных данных ДДЗ путем линейной трансформации спектра отражения космоснимков. Данные снимки обладают высокой информативностью при дешифрировании природных объектов, в частности при изучении фенологической стадии развития сельскохозяйственных культур. Вычисление коэффициентов трансформации изображения tasseled cap основано на методе главных компонент преобразования спектральных космических снимков, сводящемся к алгоритму машинного обучения, применяемому для выявления наиболее информативных признаков данных дистанционного зондирования. Для реализации этого алгоритма применены шесть из одиннадцати каналов мультиспектрального космоснимка: синий B2 (450–515 нм), зеленый B3 (525–600 нм),

красный B4 (630–680 нм), ближний ИК(NIR) B5 (845–885 нм), ближний ИК(SWIR2) B6 (1560–1660 нм), ближний ИК(SWIR3) B7 (2100–2300 нм).

С применением линейной комбинации этих данных рассчитаны три компоненты преобразования tasseled cap:

а) Brightness («яркость»), характеризующая отражательную способность почвы, по формуле:

$$\text{Brightness} = 0.3037B2 + 0.2793B3 + 0.4743B4 + 0.5585B5 + 0.5082B6 + 0.1863B7; \quad (1)$$

б) Greenness («зеленость»), характеризующая вегетационную активность растений, по формуле:

$$\text{Greenness} = -0.2941B2 - 0.243B3 - 0.5444B4 + 0.7276B5 + 0.713B6 - 0.1608B7; \quad (2)$$

в) Wetness («влажность»), характеризующая взаимодействие почвенной влаги с растительным покровом, по формуле:

$$\text{Wetness} = 0.1511B2 + 0.1973B3 + 0.3283B4 + 0.3407B5 - 0.7117B6 - 0.455B7. \quad (3)$$

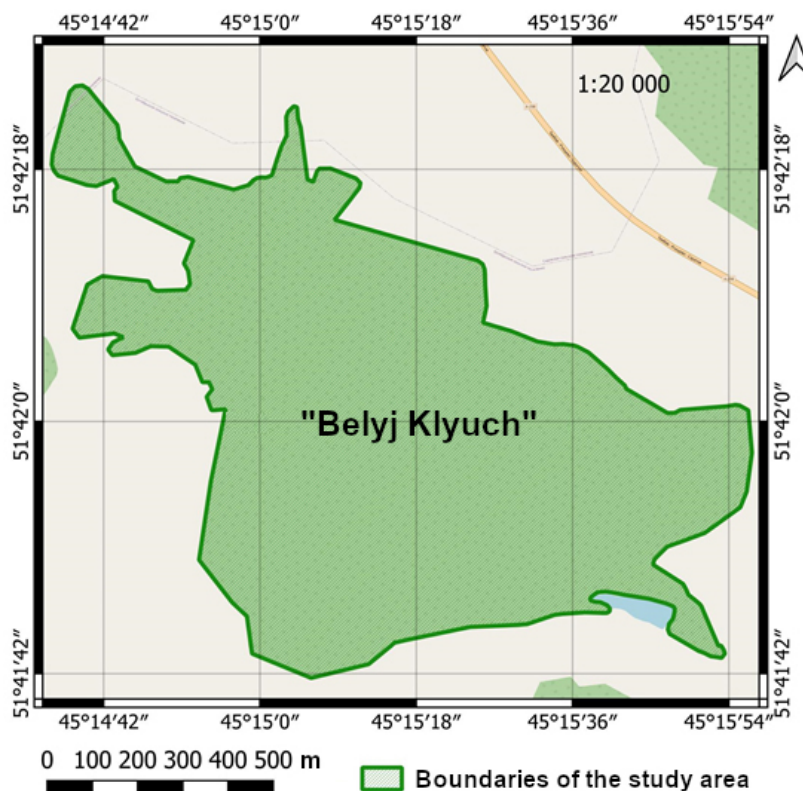


Рис. 1. Топографическая карта «Урочища Белый Ключ».

Fig. 1. Topographic map of the “Bely Klyuch” natural landmark.

Дополнительно был рассчитан EVI (enhanced vegetation index):

$$EVI = 2.5 \cdot \frac{B5 - B4}{B5 + 6B4 - 7.5B2 + 1} \quad (4)$$

Картограммы трех составляющих преобразования tasseled cap для исследуемой территории: brightness, greenness и wetness (рис. 2) и индекса EVI, а также диаграммы преобразования tasseled cap: greenness vs brightness; wetness vs brightness; greenness vs wetness; NIR (B5) vs RED (B4) (рис. 3, 4) составлены в программе SAGA GIS (версия 9.2.0).

Распознавание лесных насаждений, расположенных в «Урочище Белый Ключ», реализовано с помощью платформы искусственного интеллекта Mapflow, осуществляющей автоматический препроцессинг и анализ. Классификация участков проведена в соответствии с пороговыми значениями, применяемыми модулем AI Mapflow. Деревья и кустарниковая растительность классифицируются в зависимости от плотности насаждения и высоты: высокий лес – свыше 10 м до 99 м, средний (низкорослый, растущий) лес – свыше 4 м до 10 м включительно, кустарники – от 0 до 4 м включительно. Участки леса, соответствующие каждому классу, распознаются в виде отдельных полигонов, класс которых определяется свойствами этого объекта.

Результаты

Путем комбинирования каналов B2–B7 мультиспектрального снимка Landsat-9 получены картограммы распределения трех главных компонент – brightness, greenness и wetness (рис. 2) – преобразования tasseled cap, расположенных внутри периметра изучаемой территории.

Представленная на рис. 2 а компонента brightness (яркость) обозначена серым цветовым градиентом, greenness (зеленость) – зеленым (рис. 2 б), wetness (влажность) – синим (рис. 2 в).

Частотные гистограммы трех главных компонент преобразования tasseled cap (рис. 3)

охарактеризуют фитоэкологическое состояние лесного массива «Урочища Белый Ключ».

Дополнительно был рассчитан улучшенный вегетационный индекс EVI (enhanced vegetation index), характеризующий отражательную способность поверхности, особенно чувствительный у густой растительности, в ближнем инфракрасном и видимом красном диапазонах.

На рис. 4 представлены двухмерные диаграммы рассеяния, показывающие взаимосвязь коэффициентов главных компонент.

Объекты растительного происхождения и коммуникации были разделены плагином искусственного интеллекта на два основных класса: высокий лес (свыше 10 м до 99 м) и средний (низкорослый, растущий) (свыше 4 до 10 м включительно) (рис. 5). Установлено, что 60–65 % приходится на долю высокого леса (зеленый цвет на рис. 5), 30–35 % – на долю деревьев среднего класса (выделены на рис. 5 желтым цветом). Открытые массивы и кустарники занимают менее 2 % от общего количества растительных объектов.

Обсуждение

«Урочище Белый Ключ» является природно-экологическим каркасом Татищевского района Саратовской области и частью одноименного ООПТ, занимая площадь 152 га. Объектами охраны на этой территории являются ольха черная (*Alnus glutinosa*) и дуб черешчатый (*Quercus robur*), а также краснокнижные растения.

Преобладание объектов высотой свыше 10 м до 99 м (зеленый цвет на карте рис. 5) свидетельствует о формировании зрелого биогеоценоза. Растительные объекты таких размеров представлены крупными деревьями, составляющими верхний ярус леса. Наличие такой группы деревьев говорит о сформировавшейся лесной экосистеме, где деревья достигают зрелости и предоставляют большое количество экологических ниш для других видов растений и животных.

Меньшая доля растительных объектов размерами свыше 4 до 10 м (желтый цвет на карте

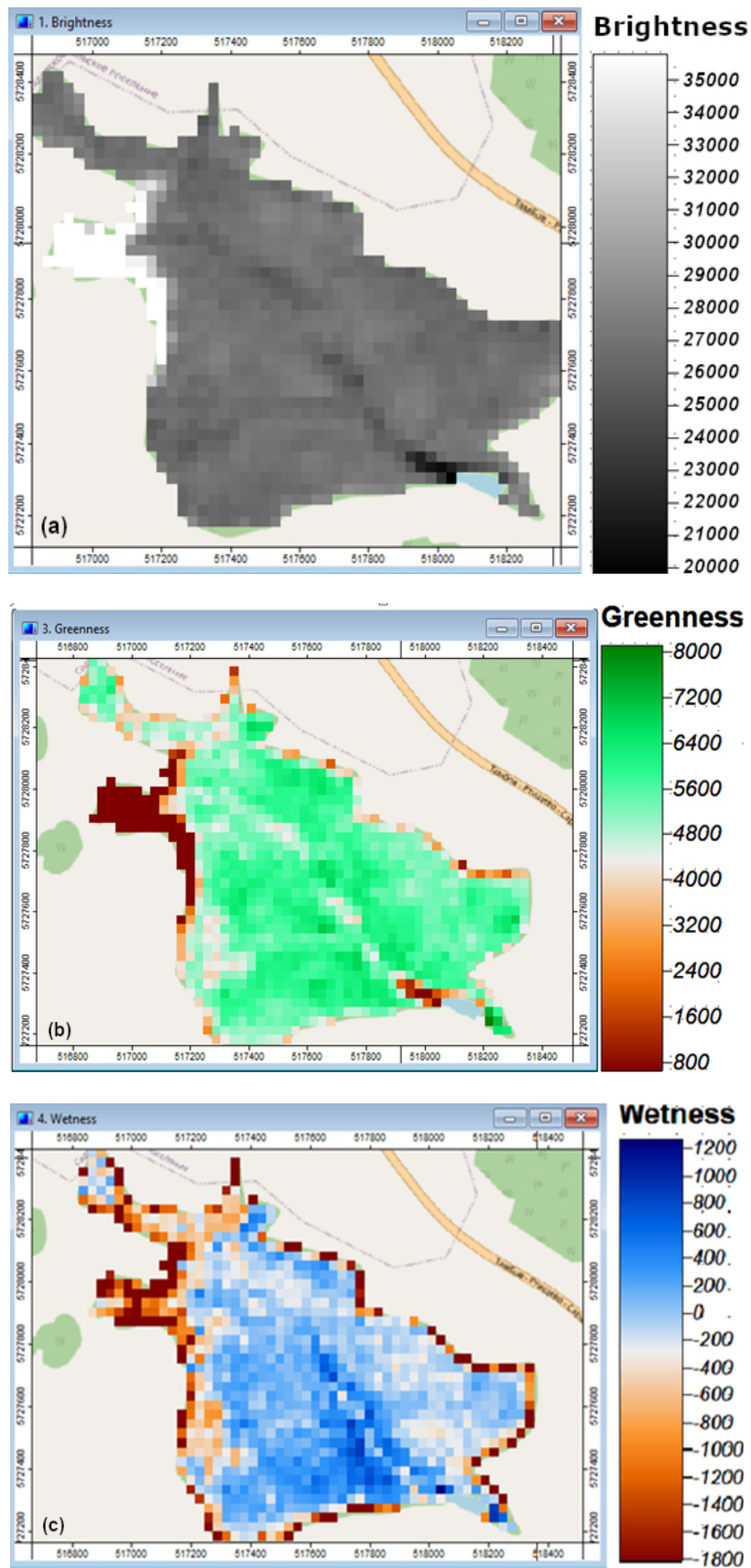


Рис. 2. Картограммы преобразования tasseled cap для изучаемой территории: (a) brightness (яркость), (b) greenness (зеленость), (c) wetness (влажность).

Fig. 2. Tasseled cap transformation cartograms for the study area: (a) brightness, (b) greenness, and (c) wetness.

рис. 5), вероятно, принадлежит подросту и молодым деревьям, обеспечивающим естественное возобновление леса. Объекты меньшего размера составляют молодые деревья дуба и ольхи, находящиеся на стадии роста, а также подлесок (кустарники и небольшие деревья, такие как лещина, бересклет) и отдельные крупные кустарники.

Наличие как крупных деревьев, так и более мелких свидетельствует о сложной вертикальной структуре леса. Это, в свою очередь, говорит о высоком биоразнообразии.

Во-первых, это биоразнообразие местообитаний разных видов, обусловленное нали-

чием многоярусной структуры леса. Различные ярусы леса предоставляют различные условия для обитания растений и животных.

Во-вторых, это возрастная структура леса. Устойчивое развитие биогеоценоза происходит за счет наличия деревьев разного возраста (от молодых до старовозрастных). Это обеспечивает стабильность экосистемы и создает условия для существования видов, приспособленных к разным стадиям развития леса. Так, роль старовозрастных деревьев в функционировании данного биогеоценоза заключается в предоставлении местообитания для гнездования птиц и убежища для летучих мышей.

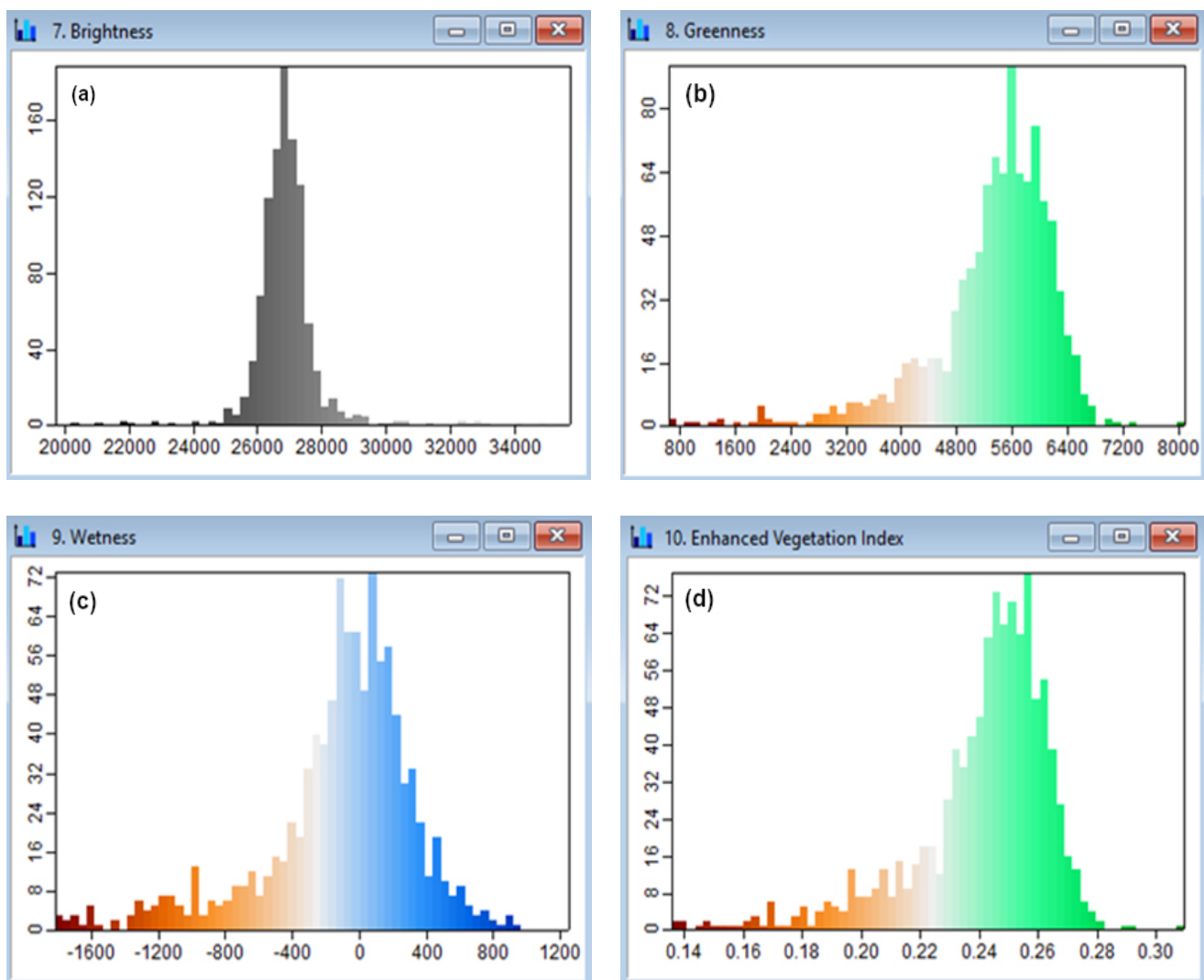


Рис. 3. Частотные гистограммы распределения значений компонент преобразования tasseled cap (a–c) и индекса EVI (d) для изучаемой территории.

Fig. 3. Frequency histograms of the distribution of values of the tasseled cap transformation components (a–c) and the EVI index (d) for the study area.

В-третьих, это видовое разнообразие. Дуб черешчатый и ольха черная создают основу для существования многих связанных с ними видов. Дуб создает местообитания насекомых, птиц и млекопитающих. Ольха, в свою очередь, предпочитает влажные места и способствует формированию почвенной флоры и фауны.

Известно [16], что преобразование tasseled cap эффективно в задаче дешифрирования спутниковых космоснимков. Для многоярусного лесного биогеоценоза, содержащего лес, кустарники, подлесок, распознавание растительных объектов на космоснимках эффективнее проводить с помощью искусственного

интеллекта. Это связано с тем, что преобразование tasseled cap является линейным преобразованием спектральных каналов, оно выделяет главные компоненты, такие как яркость, зеленость и влажность, и эффективнее работает для простых ландшафтов. Для многоярусного леса сигнал, исходящий от пикселя, является нелинейной комбинацией эффектов отражения от полога, подлеска, кустарников, кроны деревьев и других объектов. В таком случае в задаче дешифрирования спутниковых космоснимков эффективнее работает искусственный интеллект, способный устанавливать нелинейные взаимосвязи между указанными характеристиками.

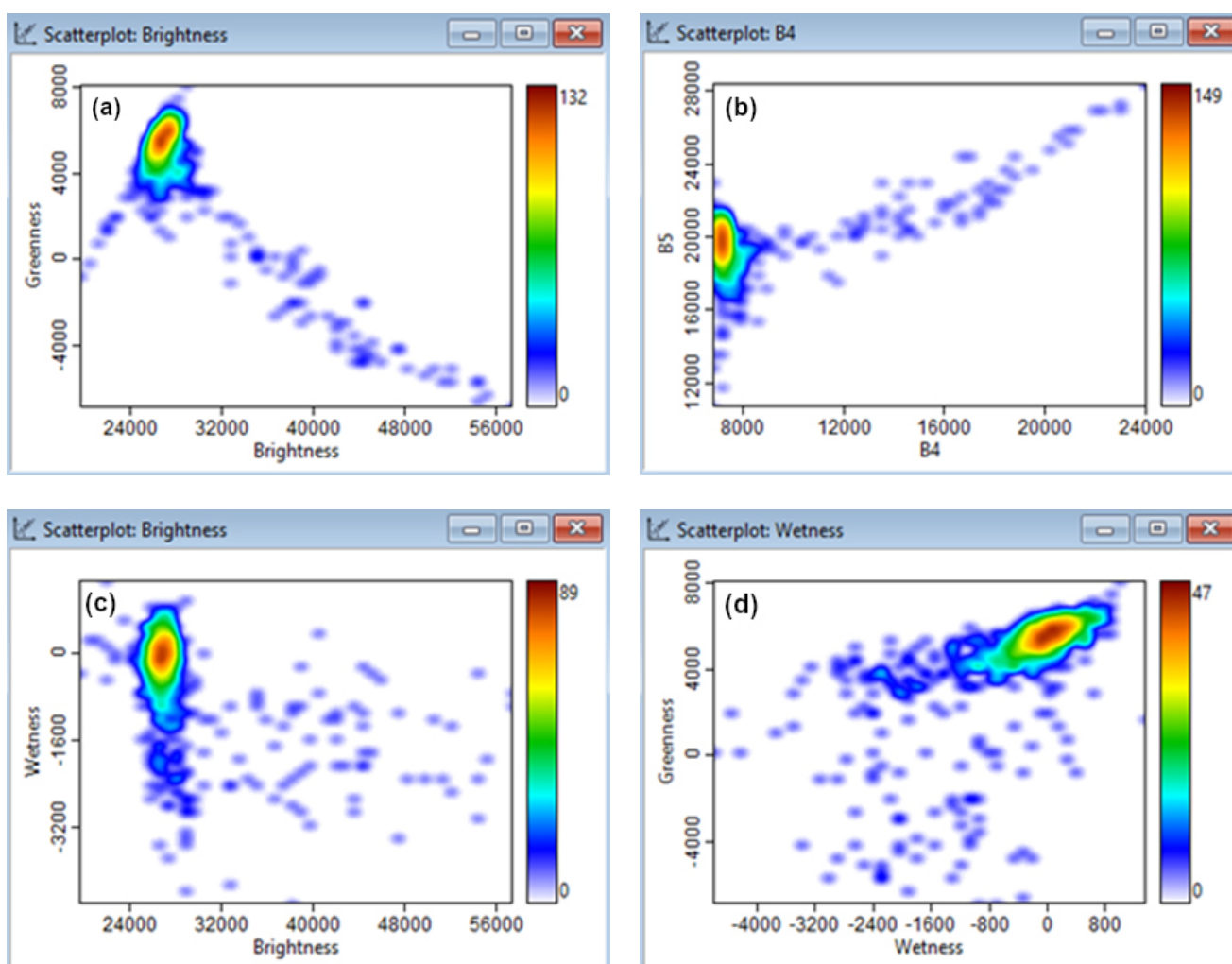


Рис. 4. Результат преобразования tasseled cap для изучаемой территории. Двухмерные диаграммы, показывающие взаимосвязь коэффициентов главных компонент: (a) greenness vs brightness; (b) NIR (B5) vs RED (B4); (c) wetness vs brightness; (d) greenness vs wetness.

Fig. 4. The result of the tasseled cap transformation for the study area. Two-dimensional diagrams showing the relationship between the coefficients of the principal components: (a) greenness vs brightness; (b) NIR (B5) vs RED (B4); (c) wetness vs brightness; (d) greenness vs wetness.

Полученные с помощью плагина распознавания космоснимков на основе искусственного интеллекта Mapflow данные о высоте растительных объектов в «Урочище Белый Ключ» позволили оценить структуру лесного массива. На основе пиксельной классификации, реализованной с помощью архитектур CNN, выделены размерные группы деревьев на космоснимках и установлено их процентное соотношение.

Преобладание высокого леса (60–65 %) указывает на то, что верхний ярус биогеоценоза занимает большую часть территории и является определяющим фактором структуры и функционирования экосистемы. Высокие деревья создают тень, влияют на микроклимат, почвенные условия и доступность света для нижних ярусов.

Открытые участки почвы, подстилка и сухая листва, более освещенные участки крон увеличивают значение компоненты яркости brightness преобразования tasseled cap и, соответственно, интенсивность серой окраски (рис. 3 а). Высокие значения brightness харак-

терны для участков леса, на которых имеются вырубки, повреждения, или участков с преобладающей открытой почвой. Сомкнутые леса характеризуются низким значением величины brightness.

Высокая величина компоненты зелени greenness (рис. 3 б) и, соответственно, более яркий зеленый оттенок на диаграмме отвечают посадкам высокой плотности и сомкнутости крон. Напротив, участки с поврежденной вырубками и гарью растительностью или открытые участки почвы будут иметь более низкие значения greenness.

Высокие значения компоненты влажности wetness (рис. 3 с) соответствуют влагообеспеченным лиственным породам деревьев. Это может быть связано с большим количеством воды в листьях, высокой биомассой или наличием влажной подстилки. Низкие значения wetness указывают на участки с дефицитом влажности.

Симметричная, компактная форма диаграммы brightness (рис. 3 а) соответствует растительному сообществу, в котором отмечается

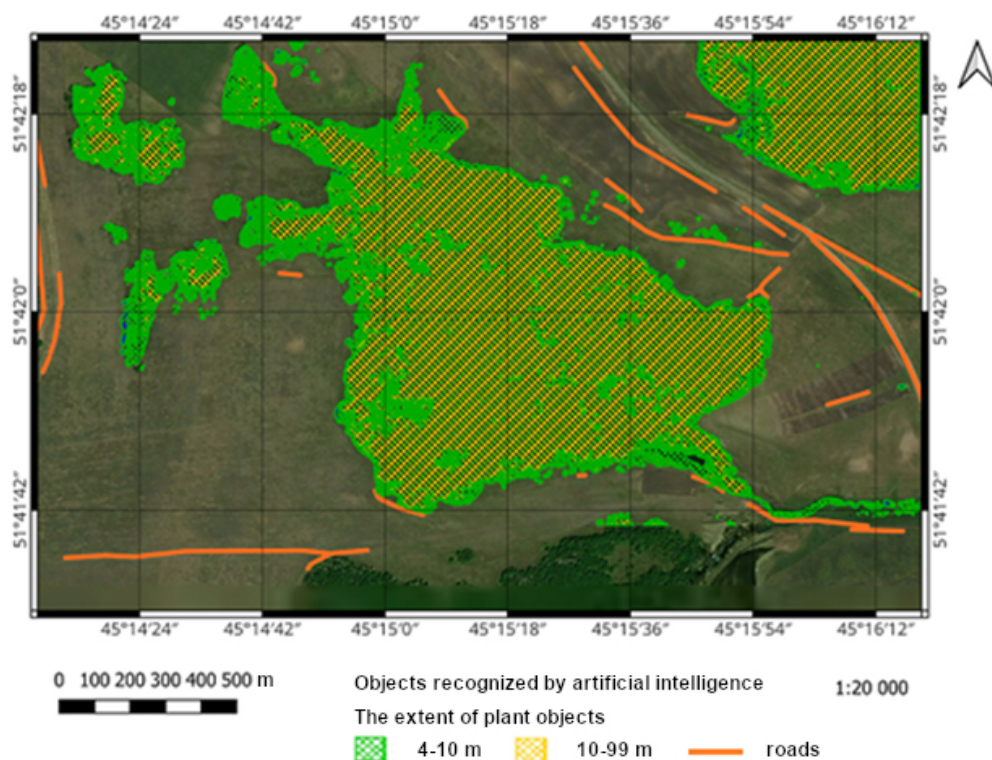


Рис. 5. Результаты распознавания растительных объектов и дорог на исследуемой территории с использованием искусственного интеллекта.

Fig. 5. Results of the AI recognition of plant objects and roads in the study area.

высокая однородность распределения высокой и низкорослой растительности и сомкнутости крон. Асимметричная, смещенная в сторону высоких значений величина компоненты зелени (*greenness*) (рис. 3 б) также соответствует высокой сомкнутости крон и густоте облиствения кроны. Об этом же свидетельствует смещенная в сторону больших значений, асимметричная форма компоненты влажности (*wetness*) (рис. 3 с), связанная с высоким влагозапасом кроны деревьев урочища, наличием листовой подстилки и запасов влаги в почве. Асимметричное распределение улучшенного вегетационного индекса *EVI*, смещенное в сторону высоких значений (рис. 3 д), свидетельствует о высокой продуктивности фитомассы деревьев на рассматриваемой территории и о высокой плотности ее распределения, что объясняется высокой сомкнутостью крон.

Структура диаграмм tasseled cap для лесного массива характеризуется нечетким, размытым характером почвенной линии, а также локальным сосредоточением пика вегетационной компоненты (рис. 3 а–д). Это объясняется тем, что, в отличие от сельскохозяйственных полей, лесная почва скрыта под листвой, опадом, мхом и поэтому отклик отражения от почвы смешивается с отражением от растительности. Кроме того, затененные участки имеют пониженную отражательную способность, а также способны маскировать почвенные участки. Таким образом, чем более диффузный характер имеет почвенная линия и чем более локальный характер имеет пик вегетационной компоненты на диаграмме tasseled cap лесного биогеоценоза, тем выше плотность расположения деревьев и выше сомкнутость их крон.

Анализ двухмерных диаграмм взаимосвязи главных компонент преобразования tasseled cap (рис. 4) позволяет выявить их особенности при анализе лесной экосистемы.

Во-первых, это нечеткость, размытость почвенной линии в преобразовании с координатами *greenness vs brightness* (рис. 4 а) и *NIR vs RED* (рис. 4 б). Данный факт можно объяснить системным характером взаимодействий компонентов лесного биогеоценоза: многослойной структурой лесного полога; фактора-

ми, снижающими отражательную способность почвы, такими как влияние фотосинтетической активности растительной биомассы, фактор тени, наличие органического вещества лесной подстилки, имеющего собственную отражательную активность.

Во-вторых, зависимости *wetness vs brightness* (рис. 4 с), *greenness vs wetness* (рис. 4 д) для лесного массива имеют высокую дисперсию. Причиной этого являются системные взаимосвязи компонентов лесной экосистемы: возрастное распределение деревьев и, как следствие, сомкнутость их крон и интенсивность отбрасываемой тени. Кроме того, влияют на данные зависимости различная плотность полога (области с густым пологом будут отличаться по влажности и зелени от участков с редким пологом), наличие подлеска, рельеф местности, с которым связаны освещенность территории и дренаж. Размытый характер зависимостей влажности от яркости и зелени от влажности является показателем устойчивого развития лесной экосистемы.

В-третьих, наличие локального участка в верхней части диаграмм главных компонент, в котором их величины изменяются в широком диапазоне значений. Это объясняется вегетационной активностью зеленой биомассы в кронах деревьев и кустарников. Внедрение подобных технологий искусственного интеллекта в практику лесоустройства и экологического мониторинга значительно повышает эффективность и точность проводимых исследований. Автоматизация процессов обработки данных и анализа изображений сокращает временные и трудовые затраты, а также минимизирует влияние человеческого фактора на результаты. Полученные данные могут быть использованы для разработки планов по устойчивому управлению лесными ресурсами, сохранению биоразнообразия и смягчению последствий изменения климата. Это, в свою очередь, способствует принятию обоснованных управленческих решений в области лесного хозяйства и охраны природы.

Научно-методическое значение сочетания метода tasseled cap и модуля искусственного интеллекта Mapflow состоит в следующем.

Метод tasseled cap преобразует многоспектральные данные дистанционного зондирования в набор ортогональных индексов, наиболее информативных для анализа растительности, снижая размерность данных до трех наиболее значимых компонент (яркость, зеленость, влажность). Отсюда следует, что данный метод акцентирует внимание на таких характеристиках, как биомасса, содержание хлорофилла и влажность. Это увеличивает эффективность алгоритмов распознавания различий в характеристиках деревьев.

Применение модуля Mapflow для распознавания высоты деревьев на основе преобразованных с помощью tasseled cap данных позволяет автоматизировать картографирование территории, устраняя ручную оцифровку. При этом с помощью алгоритмов машинного обучения (таких как сверточные сети) увеличивается точность распознавания границ деревьев и дифференциации разных объектов (деревьев, кустарников, почвы и т.д.).

Таким образом, сочетание метода tasseled cap и модуля искусственного интеллекта Mapflow позволяет получить ценную информацию для изучения и мониторинга лесных экосистем – провести оценку биомассы и запасов древесины. Используя повторные съемки и анализ на основе описанного подхода, мы можем отслеживать динамику изменений в лесном покрове, вызванных пожарами, вырубками и другими факторами. Это важно и для определения границ отдельных биогеоценозов.

Заключение

На основе анализа мультиспектральных космоснимков в видимой и ближней ИК-областях с помощью преобразования tasseled cap выделены следующие признаки устойчивого развития лесного листовенного биогеоценоза: нечеткость почвенной линии в координатах «зеленость» vs «яркость», NIR vs RED преобразования tasseled cap; высокая дисперсия зависимостей «влажность» vs «яркость»; «зеленость» vs «влажность»; наличие локального

участка в верхней части диаграмм главных компонент, в котором их величины изменяются в широком диапазоне; асимметричность и смещенность в сторону больших значений частотных диаграмм влажности, зелености, а также индекса EVI. Эти признаки объясняются системным характером взаимодействия в лесных биогеоценозах таких факторов, как многослойная структура лесного полога, влияние фотосинтетической активности растительной биомассы, фактор тени, а также возрастное распределение растительных компонентов экосистем.

Структура диаграмм tasseled cap для лесного массива характеризуется нечетким, размытым характером почвенной линии, а также локальным сосредоточением пика вегетационной компоненты. Это объясняется тем, что лесная почва скрыта под листвой, опадом, мхом и поэтому отклик отражения от почвы смешивается с отражением от растительности. Кроме того, затененные участки имеют пониженную отражательную способность, а также способны маскировать почвенные участки. Таким образом, диффузный характер почвенной линии и локальный характер пика вегетационной компоненты на диаграмме tasseled cap лесного биогеоценоза характеризуют плотность расположения деревьев и сомкнутость их крон.

Практическая значимость работы, сочетающей преобразование tasseled cap и методы искусственного интеллекта для оценки вегетационной активности лесного биогеоценоза и вклада древесных пород разной высоты, заключается в следующем.

Преобразование tasseled cap позволяет выделить основные компоненты, характеризующие состояние растительности: яркость, зеленость и влажность. Модели, созданные с помощью искусственного интеллекта, более точно оценивают вегетационную активность, чем созданные традиционными методами. Это позволяет выявлять проблемные участки леса на ранних стадиях, например зоны с растительностью, угнетенной из-за болезней, вредителей или загрязнения.

Оценка вклада древесных пород разной высоты в общую вегетационную активность

леса позволяет понять структуру лесного биогеоценоза и выявить доминирующие породы. Это важно для оценки устойчивости леса к изменениям климата, так как разные породы обладают разной устойчивостью к засухе, болезням и другим факторам. Модели искусственного интеллекта могут быть обучены для разделения вклада разных пород на основе данных дистанционного зондирования и наземных измерений.

Сочетание tasseled cap и искусственного интеллекта позволяет создать систему мониторинга изменений в лесах во времени. Это особенно важно в условиях изменяющегося климата, когда леса подвергаются воздействию новых угроз. С помощью такой системы можно оперативно выявлять изменения в состоянии лесов и принимать меры по их защите и адаптации.

Разработанные модели могут быть использованы для прогнозирования будущей вегетационной активности лесов в зависимости от различных факторов, таких как изменения климата, лесохозяйственные мероприятия или антропогенное воздействие. Это позволяет принимать более обоснованные решения в области лесопользования и планирования.

Применение дистанционного зондирования и методов искусственного интеллекта может значительно снизить затраты на мониторинг лесов по сравнению с традиционными методами, требующими большого объема наземных измерений. Это делает мониторинг более доступным и позволяет охватить значительные территории.

Список литературы

1. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. **2018**. Космос, земля и суперкомпьютинг: сопряженные задачи экологии, климата, мониторинга и дистанционного зондирования Земли, гиперспектральный подход и нанодиагностика природных сред (посвящается 65-летию ИПМ им. М.В. Келдыша РАН). *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика*, 7(4): 5–29.
2. Зеньков И.В., Кустикова Е.А., Ле Хунг Ч., Сильванович О.В., Юронен Ю.П., Маглинец Ю.А., Раевич К.В., Герасимова Е.И., Миронова Ж.В., Скорнякова С.Н. **2024**. Цифровая платформа в решении задач экологии нарушенных земель для горнодобывающих предприятий с открытыми горными работами на основе ресурсов дистанционного зондирования и искусственного интеллекта. *Экология и промышленность России*, 28(1): 52–57. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-1-52-57>
3. Каримуллах А., Братков В.В. **2024**. Оценка изменений площади зеленых насаждений Кабула по материалам дистанционного зондирования земли. *Мониторинг. Наука и технологии*, 4(62): 59–67. doi:10.25714/MNT.2024.62.008
4. Бисенбаева С.Б., Мелисбек Ш.М., Баймухан Е.К. **2024**. Обзор мониторинга лесов в Казахстане на основе наблюдения за землей. *Вестник Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология*, 147(2): 135–149. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2024-147-2-135-149>
5. Данилин И.М., Лапко В.А., Кузнецов А.А., Бабий И.А., Вайсман А.О. **2024**. Инновационный учебно-научный центр мониторинга лесных ресурсов Сибири на основе лазерной и микроволновой аэрокосмической съемки. *Сибирский аэрокосмический журнал*, 25(1): 8–17. <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2024-25-1-8-17>
6. Стрекаловская М.И., Доброворская Н.И. **2023**. Использование ГИС-технологий для создания базы данных лесовосстановления. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 4(2): 199–204. doi:10.33764/2618-981X-2023-4-2-199-204
7. Япаров И.М., Вильданов И.Р., Баширова Э.В., Гумеров Р.А., Магасумов Т.М. **2020**. Анализ многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории природного парка «Иремел» для местного лесопользования с использованием цифровых моделей рельефа. *Астраханский вестник экологического образования*, 3(57): 140–149. doi:10.36698/2304-5957-2020-19-3-140-149
8. Мамедалиева В.М. **2021**. Алгоритм и оценка изменения площади лесного покрова Хачмазского района Азербайджана средствами космического мониторинга. *Известия вузов. Лесной журнал*, 2(380): 106–115. doi:10.37482/0536-1036-2021-2-106-115
9. Черткова Е.П., Замолотчиков Д.Г. **2024**. Оценка земельных ресурсов Алтайского государственного природного биосферного заповедника с учетом уникальности биоразнообразия и ценности экосистем. *Экосистемы*, 40: 39–49. (In Russ). doi:10.29039/2413-1733-2024-40-39-49
10. Gopp N.V., Meshalkina J.L., Narykova A.N., Plotnikova A.S., Chernova O.V. **2023**. Mapping of soil organic carbon content and stocks at the regional and local levels: the analysis of modern methodological

- approaches. *Forest Science Issues*, 6(4): 1–46. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202361-120>
11. Калиничева С.В., Никифорова Н.Н., Максимов Н.А., Мисайлов И.Е., Федоров А.Н. **2021**. Исследование наступления леса на тундру в регионе Восточной Сибири в условиях меняющегося климата с применением ГИС и данных дистанционного зондирования Земли. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле*, 4(24): 73–82. doi:10.25587/SVFU.2021.24.4.017
 12. Алексеев А.С., Черниховский Д.М. **2024**. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 2(398): 11–28. doi:10.37482/0536-1036-2024-2-11-28
 13. Беспалова В.В., Полянская О.А. **2021**. Внедрение цифровых технологий на предприятиях лесного комплекса. *Журнал прикладных исследований*, 2(4): 66–70. doi:10.47576/2712-7516_2021_2_4_66
 14. Иванова Н.В., Шашков М.П., Лебедев А.В., Шанин В.Н. **2024**. Количественный анализ факторов, влияющих на повреждение старовозрастного южнотаежного древостоя в результате катастрофического ветровала, на основе дистанционных и объединенных данных. *Экология*, 4: 284–292. <https://doi.org/10.31857/S0367059724040043>
 15. Линкина А.В., Елсуков В.Д., Тришин А.А. **2023**. Использование моделей машинного обучения при решении задач в отрасли органического сельского хозяйства. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 85(4): 133–138.
 16. Николаев А.А., Николаева И.О. **2022**. Преобразование цифровых данных космической съемки алгоритмом tasseled cap при определении структуры лесных насаждений. *Международный научно-исследовательский журнал*, 9(123): 1–5. doi:10.23670/IRJ.2022.123.77; URL: <https://research-journal.org/archive/9-123-2022-september/10.23670/IRJ.2022.123.77> (accessed 20.04.2025).
 17. Zenkov I., Kustikova E., Le Hung Ch., Silvanovich O., Yuronen Yu., Maglinets Yu., Raevich K., Gerasimova E., Mironova Zh., Skornyakova S. **2024**. The digital platform for resolving problems of ecology of disturbed lands for mining companies with open-pit mining based on remote sensing resources and artificial intelligence. *Ecology and Industry of Russia*, 28(1): 52–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-1-52-57>
 18. Karimullah A., Bratkov V.V. **2024**. Evaluation of changes in the urban green space area of Kabul, Afganistan. *Monitoring. Science and Technologies*, 4(62): 59–67. (In Russ.). doi:10.25714/MNT.2024.62.008
 19. Bissenbayeva S., Melisbek Sh., Baymukan Er. **2024**. An overview of forest monitoring in Kazakhstan based on Earth observation. *Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography. Ecology Series*, 147(2): 135–149. (In Russ.). <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2024-147-2-135-149>
 20. Danilin I.M., Lapko V.A., Kuznetsov A.A., Babi I.A., Vaisman A.O. **2024**. Innovative educational and research center for monitoring forest resources of Siberia based on laser and microwave aerospace imaging. *Siberian Aerospace Journal*, 25(1): 8–17. <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2024-25-1-8-17>
 21. Strekalovskaya M.I., Dobrotvorskaya N.I. **2023**. Using GIS technologies to create a reforestation database. *Interexpo GEO-Siberia*, 4(2): 199–204. (In Russ). doi:10.33764/2618-981X-2023-4-2-199-204
 22. Yaparov I.M., Vildanov I.R., Bashirova E., Gumerov R.A., Magasumov T.M. **2020**. Analysis of multi-year dynamics of the NDVI growing index in the Iremel Natural Park for local forest management using digital terrain models. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*, 3(57): 140–149. (In Russ). <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2020-19-3-140-149>
 23. Mamedaliyeva V.M. **2021**. Algorithm and measurement of forest cover area change in the Khachmaz region of Azerbaijan by satellite monitoring. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2(380): 106–115. (In Russ). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-2-106-115>
 24. Chertkova E.P., Zamolodchikov D.G. **2024**. Assessment of land resources of the Altai State Nature Biosphere Reserve considering the uniqueness of biodiversity and the value of ecosystems. *Ecosystems*, 40: 39–49. (In Russ). doi:10.29039/2413-1733-2024-40-39-49
 25. Gopp N.V., Meshalkina J.L., Narykova A.N., Plotnikova A.S., Chernova O.V. **2023**. Mapping of soil organic carbon content and stocks at the regional and local levels: the analysis of modern methodological

References

1. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. **2018**. Space, Earth and supercomputing: Conjugate problems of ecology, climate, monitoring and remote sensing of Earth, hyper-spectral approach and nanodiagnostics of natural environments (Dedicated to the 65th anniversary of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences). *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathe-*

- approaches. *Forest Science Issues*, 6(4): 1–46. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202361-120>
11. Kalinicheva S.V., Nikiforova N.N., Maksimov N.A., Misailov I.E., Fedorov A.N. **2021**. Investigation of the forest attack on the tundra in the Eastern Siberia region in a changing climate using GIS and Earth remote sensing data. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta imeni M.K. Ammosova. Seriya: Nauki o Zemle*, 4(24): 73–82. (In Russ.). doi:10.25587/SVFU.2021.24.4.017
 12. Alekseev A.S., Chernikhovskiy D.M. **2024**. Identification of damage to coniferous stands based on comprehensive analysis of the results of remote sensing of the Earth and ground surveys. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2: 11–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-11-28>
 13. Bepalova V.V., Polyanskaya O.A. **2021**. Implementation of digital technologies at the enterprises of the forest complex. *Journal of Applied Research*, 2(4): 66–70. (In Russ.). doi:10.47576/2712-7516_2021_2_4_66
 14. Ivanova N.V., Shashkov M.P., Lebedev A.V., Shannin V.N. **2024**. Quantitative analysis of factors influencing damage to old-growth hemiboreal stands as a result of a catastrophic windthrow, based on remote sensing and merged data. *Ekologiya*, 4: 284–292. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0367059724040043>
 15. Linkina A.V., Elsukov V.D., Trishin A.A. **2023**. The use of machine learning models in solving problems in the field of organic agriculture. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 85(4): 133–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2023-4-133-138>
 16. Nikolaev A.A., Nikolaeva I.O. **2022**. [Transformation of digital satellite imagery data by the tasseled cap algorithm in determining the structure of forest plantations]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal*, 9(123): 1–5. (In Russ.). doi:10.23670/IRJ.2022.123.77; URL: <https://research-journal.org/archive/9-123-2022-september/10.23670/IRJ.2022.123.77> (accessed 20.04.2025).

Об авторах

Сотрудники Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, Саратов, Россия:

Косарев Антон Валериевич (<https://orcid.org/0000-0002-6614-7297>), кандидат химических наук, доцент кафедры «Цифровое управление процессами в АПК», aleteia@inbox.ru

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

Ключиков Аркадий Викторович (<https://orcid.org/0000-0002-8657-6486>), кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Цифровое управление процессами в АПК», krok9407@mail.ru

Чумакова Светлана Валентиновна (<https://orcid.org/0000-0002-2877-0758>), кандидат технических наук, заместитель директора Института генетики и агрономии, ch-sv@yandex.ru

Леонтьев Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, заместитель директора Института инженерии и робототехники, aleksei_leontev@list.ru

About the Authors

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

Kosarev, Anton V. (<https://orcid.org/0000-0002-6614-7297>), Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor at the Department of Digital process management in the agro-industrial complex, aleteia@inbox.ru

Sergeeva, Irina V. (<https://orcid.org/0000-0001-6824-1597>), Doctor of Biology, Head of the Department of Botany and ecology, ivsergeeva@mail.ru

Klyuchikov, Arkady V. (<https://orcid.org/0000-0002-8657-6486>), Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Digital process management in the agro-industrial complex, krok9407@mail.ru

Chumakova, Svetlana V. (<https://orcid.org/0000-0002-2877-0758>), Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of Genetics and Agronomy Institute, ch-sv@yandex.ru

Leontiev, Aleksei A., Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of Engineering and Robotics Institute, aleksei_leontev@list.ru

Поступила 29.05.2025

Принята к публикации 05.08.2025

Received 29 May 2025

Accepted 5 August 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 597.5.574.583

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.299-324>
<https://www.elibrary.ru/klqatc>

Условия нереста японского анчоуса *Engraulis japonicus* (Engraulidae) в юго-восточной части Сахалинского залива (Охотское море)

О. Н. Мухаметова[@], И. Н. Мухаметов

^{@E-mail:} olga.sakhniro@gmail.com

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

Резюме. В работе представлены результаты исследований условий нереста японского анчоуса *Engraulis japonicus* в юго-восточной части Сахалинского залива в конце августа 2011 г. Развитие икры и личинок происходило в широком диапазоне температуры воды и солености. Тем не менее при нересте анчоус избегал районов вторжения холодных охотоморских вод, сильно опресненных амурских вод и районов действия береговых стоков с мутностью более 7 FTU и соленостью менее 10 ‰. Массовый нерест происходил в ограниченном диапазоне глубин 13–15 м при средней температуре 9.9 °С во всем слое и 15.4 °С у поверхности, солености – 22.1 и 19.3 ‰ и мутности 1.9 и 2.3 FTU соответственно. Высокие концентрации икры – до 657 экз./м³ в толще воды и до 223 экз./м³ в поверхностном слое – формировались на локальных участках с высокой продуктивностью планктонных и бентосных сообществ. Участок максимальных скоплений икры совпадал с заглублением вод с температурой 8–10 °С и более до горизонта 10 м. В этом слое наблюдалось стабильное содержание кислорода – в пределах 8–10 мг/л, и невысокая мутность – до 2 FTU. Доля нежизнеспособных икринок была – от 0.7 % в поверхностном слое до 4.4 % в толще воды. Общая продолжительность нереста в Сахалинском заливе, предположительно, составляла 1.5 мес.

Ключевые слова: Сахалинский залив, японский анчоус, икра, личинки, плотность, распределение, факторы среды

Spawning conditions of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* (Engraulidae) in the southeastern part of Sakhalin Gulf (the Sea of Okhotsk)

Olga N. Moukhametova[@], Ilias N. Moukhametov

^{@E-mail:} olga.sakhniro@gmail.com

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

Abstract. This paper presents the results of studies of the spawning conditions of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the southeastern part of Sakhalin Gulf at the end of August 2011. The development of eggs and larvae occurred over a wide range of temperature and salinity. Nevertheless, during spawning, anchovy avoided the areas of the intrusion of cold waters of the Sea of Okhotsk, strongly desalinated Amur waters and the areas of coastal runoff with turbidity greater than 7 FTU and salinity less than 10 ‰. Mass spawning occurred within a limited depth range of 13–15 m with an average temperature of 9.9 °C throughout the whole layer and 15.3 °C at the surface, salinity of 22.1 and 19.3 ‰ and water turbidity of 1.9 and 2.3 FTU, respectively. High abundance of eggs – up to 657 eggs/m³ in the water column and up to 223 eggs/m³ in the surface layer – were formed in local areas with high productivity of planktonic and benthic communities. The area of maximum concentration of eggs coincided with the deepening of waters with temperatures of 8–10 °C and higher up to the 10 m layer. In this layer, stable oxygen content of 8–10 mg/l and low turbidity of up to 2 FTU were observed. The proportion of non-viable eggs was low, from 0.7 % in the surface layer to 4.4 % in the water column. The total duration of spawning in Sakhalin Gulf was assumed to be 1.5 months.

Keywords: Sakhalin Gulf, Japanese anchovy, eggs, larvae, abundance, distribution, environmental factors

Для цитирования: Мухаметова О.Н., Мухаметов И.Н. Условия нереста японского анчоуса *Engraulis japonicus* (Engraulidae) в юго-восточной части Сахалинского залива (Охотское море). *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 3, с. 299–324. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.299-324>; <https://www.elibrary.ru/klqatc>

For citation: Moukhametova O.N., Moukhametov I.N. Spawning conditions of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* (Engraulidae) in the southeastern part of Sakhalin Gulf (the Sea of Okhotsk). *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 3, pp. 299–324. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.299-324>

Введение

Японский анчоус *Engraulis japonicus* Temmink et Schlegel, 1846 является мелким, короткоцикловым стайным пелагическим видом, основная часть ареала которого находится в Желтом, Восточно-Китайском и Японском морях. Численность анчоуса подвержена значительным межгодовым колебаниям как из-за активного промысла в странах юго-восточной Азии, так и под влиянием факторов среды, в том числе климатических [1–4]. При высокой численности в теплый период года анчоус совершает нагульно-нерестовые миграции к берегам о. Сахалин [5]. Вдоль западного побережья острова он может подниматься далеко на север и через прол. Невельского проникать в Амурский лиман и в Сахалинский залив [6–8]. Вдоль восточного побережья достигает 53° с.ш. [9, 10].

Температура, как регулятор физиологических процессов эмбрионов и личинок, является одним из основных факторов, инициирующих икротетание анчоуса [11–13]. Широкий диапазон температур во время нереста – от 13–15 °С до 29 °С для прибрежных группировок [2, 4, 14–16], 5–12.6 °С и выше для мигрирующих группировок [17] – позволил отнести этот вид к эвритермным [18]. В центральной части ареала нерест анчоуса может длиться практически круглогодично. Для тихоокеанских вод Японии съемками подтверждено икротетание с января по октябрь [19]. По мере продвижения на север вымет икры сдвигается на более поздние сроки [20], нерестовый период сокращается. В водах Приморья основной нерест приходится на май–июль [21, 22], в Охотском море и в Татарском проливе – на июль–август [23–26], в отдельные годы может продолжаться до октября [27].

Порционный нерест приходится преимущественно на темное время суток [14]. В зави-

симости от условий интервал между выметами порций составляет от одного до девяти дней [17]. В период массового нереста для анчоуса характерно образование плотных скоплений икры, размеры которых чаще всего не превышают 0.3 км [28].

Вымет икры происходит в широком диапазоне солености – от морской и близкой к морской (27.3–34.8 ‰, в среднем 33.3 ‰) в водах, омывающих Корейский п-ов [12], до очень вариабельных величин в эстуариях – 2.9–31.6 ‰ в районе р. Янцзы [11] и 4.3–32.8 ‰ в районе р. Хуанхэ [29]. Тем не менее, икра анчоуса не образует массовых концентраций в сильно опресненных районах и распределяется преимущественно у внешней границы эстуариев [30]. Личинки и мальки, более устойчивые к пониженной солености, могут расселяться на опресненных прибрежных участках, богатых кормовыми ресурсами [12, 31]. Толерантность к изменению солености позволяет анчоусу размножаться в эстуариях крупных рек юго-восточной Азии, где большое количество выносимых биогенов обеспечивает высокие величины первичной продукции и численности кормовых организмов, что чрезвычайно важно для развития и роста личинок и молоди рыб [32–34], а гидродинамические системы способствуют удержанию икры в пределах участков массового нереста с благоприятными условиями среды [35, 36].

Несмотря на важную роль в летней экосистеме Охотского моря и Татарского пролива, а также потенциальную промысловую значимость [5, 9, 10], репродуктивная биология анчоуса у северных границ ареала практически не изучена. Вопросы, связанные с локализацией районов нереста и выростных зон, остаются открытыми. Только в одной работе обобщены данные по распределению ранних стадий развития анчоуса в период высокой численности и высказаны предположения о путях нересто-

вых миграций производителей [23]. Еще в ряде исследований приведены сведения о встречаемости икры и личинок анчоуса в отдельные годы на локальных участках [24–27, 37].

Сахалинский залив, являющийся частью внешнего эстуария р. Амур с преобладающими глубинами 20–50 м [8], относится к одному из немногих мест с очень высокими концентрациями икры и личинок анчоуса [38]. Максимальный расход р. Амур приходится на май – октябрь. В этот период происходит регулярный вынос вод амурского плюма из Амурского лимана в Сахалинский залив [39]. Юго-восточная часть залива находится под постоянным воздействием опресненных и в летний период более теплых, чем на остальной акватории залива, вод [40], образующих на выходе из Амурского лимана стоковую линзу с соленостью до 15 ‰ [41]. Эта акватория отличается максимальным выносом взвешенных веществ (ВВ), большими концентрациями фитопланктона и высокой продуктивностью [42–44].

Для Сахалинского залива характерны значительные скорости течений, достигающие на выходе из Амурского лимана 2.34 м/с [45]. Приливные течения очень мощные, но практически не изучены. Существенное влияние на динамику вод оказывают гравитационные течения. В восточной части Сахалинского залива эти течения участвуют в образовании антициклонической циркуляции, способной удерживать дрейфующие объекты до месяца [46], что важно для стабильного развития рыб на ранних стадиях онтогенеза.

Смешение охотоморских и амурских вод определяет вариабельность параметров среды в юго-восточной части Сахалинского залива. Амурский сток хорошо идентифицируется по солености, температуре, содержанию хлорофилла *a*, мутности, уровню моря [44, 47]. На восточную часть исследуемой акватории большое влияние оказывает также сток заливов Байкал и Помрь. Наличие на выходе из зал. Байкал острова Уш и двух проливов – Восточного и Западного проходов, приводит к формированию сложной гидродинамики на прилегающих участках Сахалинского залива [48]. Поступление больших объемов теплых опресненных вод совпадает с нерестовым периодом многих видов рыб, в том числе японского анчоуса, совер-

шающего в Сахалинский залив протяженные нагульно-нерестовые миграции.

Цель данной работы – анализ условий среды и их влияния на распределение икры и личинок анчоуса в юго-восточной части Сахалинского залива.

Материал и методика

В странах юго-восточной Азии, где развит масштабный промысел японского анчоуса и изучению его репродуктивной биологии уделяют большое внимание, для получения необходимых данных широко применяют ихтиопланктонные съемки [12, 19, 49]. Для изучения нереста анчоуса в юго-восточной части Сахалинского залива также использованы результаты ихтиопланктонной съемки, выполненной в третьей декаде августа 2011 г. в диапазоне глубин от 0.5 до 31 м (рис. 1). До глубины 10 м отбор проб осуществляли с моторной лодки при помощи малой икорной сети ИКС-50 (площадь входного отверстия 0.2 м², размер ячеей 0.35 мм). При этом над глубиной до 1 м отбор проводили только в поверхностном слое горизонтальным тралением сети на протяжении



Рис. 1. Схема ихтиопланктонных станций и гидрологических разрезов в юго-восточной части Сахалинского залива в августе 2011 г.

Fig. 1. Map of ichthyoplankton sampling and hydrological transects in the southeastern part of Sakhalin Gulf in August 2011

100 м, на глубинах от 1 до 10 м выполняли горизонтальные обловы в поверхностном слое и вертикальные обловы от дна до поверхности.

На глубинах более 10 м ихтиопланктон отбирали с борта НИС «Дмитрий Песков» сетью ИКС-80 (площадь входного отверстия 0.5 м², размер ячеей 0.35 мм) также двумя способами – тотальным обловом от дна до поверхности и горизонтальным тралением в поверхностном слое в течение 10 мин. при скорости судна 2 узла. Суммарно было отобрано и обработано 35 проб ихтиопланктона (табл. 1).

Все ихтиопланктонные станции сопровождалось гидрологическим зондированием. Для измерения температуры, солености, мутности, содержания кислорода в прибрежной зоне использовали зонд YSI-85 фирмы YSI Incorporated (США), на глубинах более 10 м – гидрологический комплекс ICTD FSI Integrated фирмы Falmouth Scientific Inc. (США). Данные получали с дискретностью 1 м. Для анализа использовали значения параметров среды в поверхностном слое 1–0 м, в придонном слое, а также осредненные величины для всего слоя от дна до поверхности, полученные для каждой станции. Осредненные для всего слоя и для поверхностного слоя величины параметров среды сопоставляли с концентрациями икры и личинок анчоуса, полученными, соответственно, в вертикальных ловах от дна до поверхности и в горизонтальных ловах в поверхностном слое.

Камеральную обработку проб осуществляли по стандартным методикам [50]. Икру и личинок рыб под бинокляром отбирали из уловов в отдельную емкость. Затем идентифицировали виды и подсчитывали число икринок и личинок каждого вида в пробе. Для анализа проб использовали бинокляр Olympus SZX10 с окуляр-микрометром, позволяющим измерять объекты с точностью до 0.1 мм. С учетом площади входного отверстия сети

и протрального расстояния рассчитывали количество икры и личинок в 1 м³.

В пробах определяли жизнеспособные и нежизнеспособные икринки. К нежизнеспособным относили икринки с мертвыми и аномально развивавшимися эмбрионами. При выявлении эмбриональных патологий ориентировались на описания нормального развития и известных в раннем онтогенезе рыб патологий [21, 49]. Долю нежизнеспособных икринок рассчитывали в процентах относительно общего количества выловленной икры за период съемки [49].

Для визуализации пространственного распределения параметров среды и уловов ихтиопланктона использовали программу Surfer 17.

Статистическая обработка данных выполнена в программе Statistica 10. В статистический анализ были включены пять биологических переменных (плотность икры на I–III стадиях, мертвой икры, личинок анчоуса) и пять переменных, характеризующих условия среды (глубина, температура, соленость, мутность, содержание кислорода). Проверку данных на соответствие нормальному распределению проводили в модуле «Настройка распределения» (Distribution fitting) с помощью критерия Шапиро–Уилка (Shapiro-Wilk's W test). Выбор методов дальнейшего анализа сделан исходя из того, что распределение анализируемых показателей не соответствовало нормальному. Для выявления корреляции между параметрами среды и плотностью икры и личинок использовали ранговый коэффициент корреляции Спирмена (Spearman's rank correlation coefficient), применяемый для данных, не подчиняющихся закону нормального распределения. Для оценки воздействия параметров среды на распределение икры и личинок анчоуса и выявления связи между скоплениями икры на разных стадиях развития использовали факторный анализ

Таблица 1. Информация по отбору ихтиопланктонных проб

Table 1. Information on ichthyoplankton sampling

Плавсредство	Сроки отбора	Глубина, м	Тип лова		Всего
			горизонтальный	вертикальный	
Моторная лодка	20–25.08.2011	0.5–10	8	3	11
НИС «Дмитрий Песков»	23–25.08.2011	10–30	12	12	24
<i>Итого</i>			20	15	35

(Factorial ANOVA) из раздела программы «Многомерные статистические модели» (Multivariate exploratory techniques), относящийся к аналитическим методам статистики и предназначенный для изучения множественных связей между разными факторами [51].

Результаты

Условия среды

В августе 2011 г. в юго-восточной части Сахалинского залива температура в поверхностном слое варьировала от 13.3 до 20.6 °C и в среднем составляла 17.22 ± 2.25 °C. Наибольший прогрев отмечен в районе банки Северной. Теплые поверхностные воды отличались пониженной соленостью – в среднем 16.4 ± 5.67 ‰ при вариациях от 8.4 до 23.9 ‰. Большая часть исследованной акватории была заполнена прогретыми до 15 °C опресненными водами с соленостью до 20 ‰. Поступление более холодных вод с более высокой соленостью наблюдалось в северной и северо-западной части акватории (рис. 2).

Придонный слой характеризовался значительным разбросом температуры и солености – от 1.01 до 17.30 °C (в среднем 6.91 ± 4.68 °C) и от 13.9 до 32.74 ‰ (в среднем 28.85 ± 5.38). Температурный минимум и максимум солености регистрировали в северо-западной части акватории. Прогретые до 15 °C воды с соленостью ниже 20 ‰ были отмечены только в узкой прибрежной полосе на глубинах менее 5 м.

В поверхностном слое критические значения солености – менее 26 ‰, при которых происходит смена морских сообществ на эстуарные [52, 53], наблюдались практически повсеместно, за исключением небольшого участка у северо-западной границы исследованной акватории. В придонном горизонте изогалина 26 ‰ залегала на глубинах от 5 до 10 м. Ей соответствовала средняя температура воды около 11.5 °C. Средняя соленость была близка к 30 ‰ уже в диапазоне 10–15 м и на больших глубинах увеличивалась незначительно.

Мутность варьировала у поверхности от 1.06 до 11.89 FTU при средней величине 4.26 ± 3.19 FTU, у дна – от 0.26 до 10.67 FTU при средней величине 3.59 ± 3.00 FTU. Воды с максимальной мутностью отмечены в юго-

восточной части акватории на границе с Амурским лиманом. Локальные очаги повышенной мутности наблюдались также в зонах активной гидродинамики – у уреза воды и в районе проливов зал. Байкал.

Максимальное содержание кислорода (до 12.25 мл/л) в поверхностном слое было отмечено посредине северной границы исследованного участка и у Западного прохода зал. Байкал. В среднем у поверхности значение составляло 9.81 ± 1.33 мл/л. Содержание кислорода у дна колебалось от 5.85 до 10.47 (в среднем 9.22 ± 1.08 мл/л), при этом придонные слои у Западного прохода зал. Байкал были наиболее обеднены по данному показателю.

На рис. 3 представлены вертикальные профили температуры и солености. На поперечном разрезе 1 хорошо прослеживалось распространение теплых вод с температурой 10 °C до глубины более 15 м в восточной прибрежной части и уменьшение толщины прогретого слоя до 4–5 м в западной части разреза. На продольном разрезе прогретый слой распространялся до глубины 6–11 м. Максимальное заглубление теплых вод отмечалось в северной части разреза, что могло быть следствием формирования в Сахалинском заливе антициклонического круговорота [46]. Толщина слоя с пониженными значениями солености как на продольном, так и на поперечном разрезе повторяла ход температуры.

Прогрев восточной части акватории, видимый на поперечном разрезе, был связан как с поступлением амурских вод, так и с береговым стоком. На продольном разрезе прослеживалось распространение амурских трансформированных вод.

Наиболее высокой мутностью характеризовался приповерхностный слой 0–5 м – в среднем 2.71 FTU при разбросе значений от 0.03 до 11.89 FTU. Разница между максимальным и минимальным значениями в поверхностном 5-метровом слое составляла 11.86 FTU, на горизонте 11–15 м – 10.5 FTU.

Вертикальные вариации температуры были значительными до глубины 15–20 м: разница между максимальными и минимальными величинами достигала 7 °C. В слое 0–5 м средняя температуры составляла 15.45 °C, на максимальных 26–31 м снижалась до 2.60 °C.

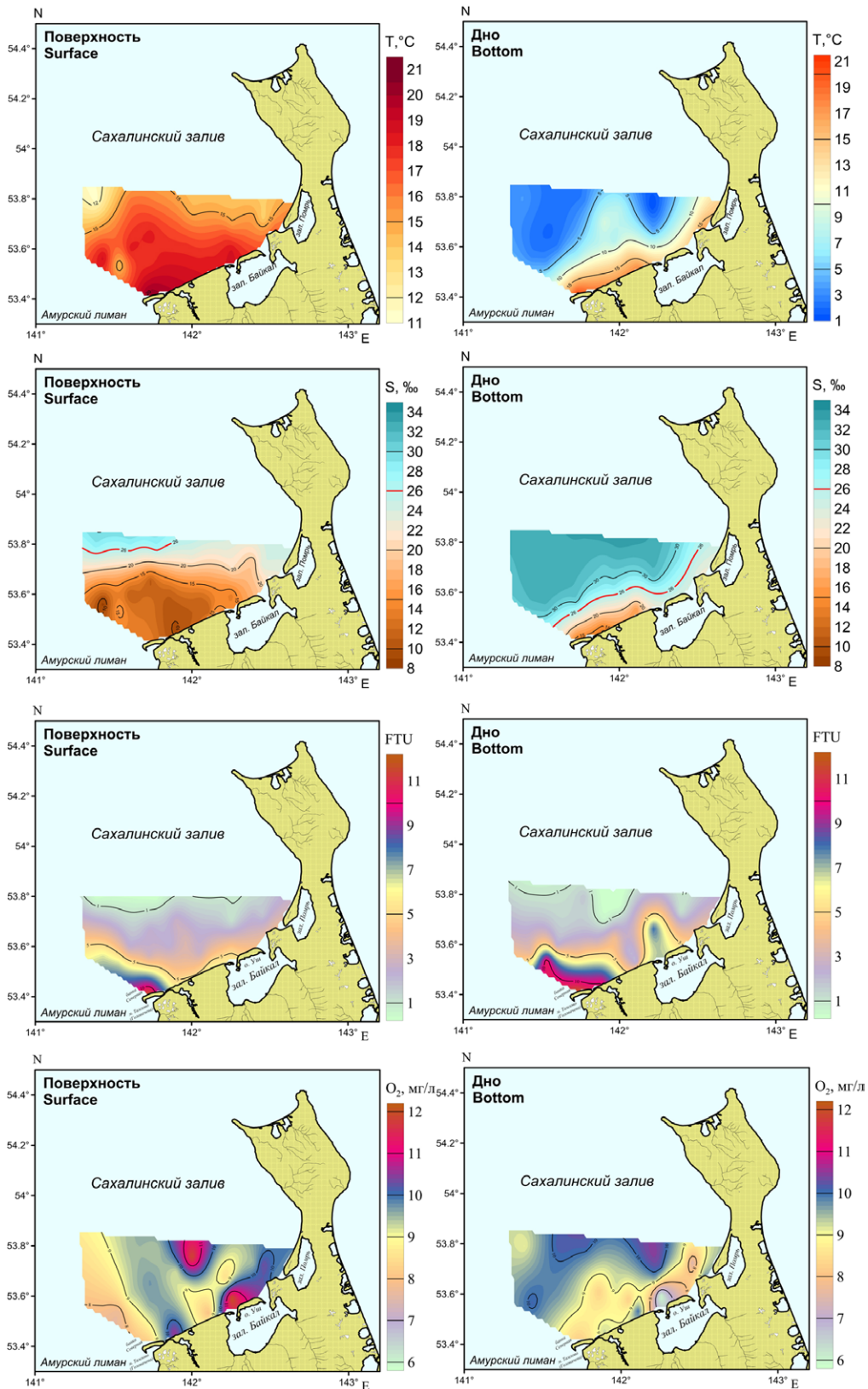


Рис. 2. Пространственное распределение параметров среды в поверхностном и придонном горизонтах в юго-восточной части Сахалинского залива в августе 2011 г. (красной линией выделена пограничная между морскими и эстуарными сообществами изогалина 26 ‰).

Fig. 2. Spatial distribution of environmental parameters in the surface and bottom layers in the southeastern part of Sakhalin Gulf in August 2011 (red line marks the boundary between the marine and estuarine communities of the 26 ‰ isohaline).

Средняя соленость возрастала с 18.7 ‰ в слое 0–5 м до 32.6 ‰ на горизонте 26–31 м. Значительная вариабельность солености была выражена преимущественно в 10-метровом приповерхностном слое, где разница достигала 20.6–22.6 ‰. В более глубоких горизонтах колебания солености сокращались до 0.4–5.0 ‰.

Если в распределении температуры, солености и мутности больше прослеживалась меридиональная направленность, что обусловлено распространением амурских вод с юга на север, то участки с повышенным содержанием кислорода распределялись мозаично. Рост концентраций до 10 мг/л и более прослеживался как в зонах активной гидродинамики у побережья, преимущественно вблизи лагунных проливов, так и в северной мористой части, находящейся под действием морских вод с низкими значениями температуры (см. рис. 2).

Икра и личинки анчоуса в сообществе ихтиопланктона

В составе ихтиопланктона юго-восточной части Сахалинского залива было отмечено 10 видов рыб из разных экологических группировок. В пробах встречались икра и личинки

элиторального минтая *Gadus chalcogrammus* Pallas, 1814. Неритический комплекс был представлен личинками рыбы-лапши *Salangichthys microdon* (Bleeker, 1860) и тихоокеанской сельди *Clupea pallasii* Valenciennes, 1847, мальками девятиглай *Pungitius pungitius* (Linnaeus, 1758) и трехглай *Gasterosteus aculeatus* Linnaeus, 1758 колюшек. Эти эвригалинные виды обычны как в лагунно-эстуарных комплексах, так и в открытом морском побережье. Из типично морских представителей донно-придонной фауны в уловах отмечены личинки тихоокеанской песчанки *Ammodytes hexapterus* Pallas, 1814 и липариса Кузнецова *Liparis kusnetzovi*, Taranetz, 1936, икра и личинки двух видов камбал – желтоперой *Limanda aspera* Pallas, 1814 и сахалинской *Limanda sakhalinensis* Hubbs, 1915.

Но, несмотря на северное положение Сахалинского залива, наиболее многочисленным видом в составе ихтиопланктона являлся субтропический мигрант – японский анчоус. Икра анчоуса формировала 94.7 % суммарной численности икры рыб в поверхностном слое и 94.2 % в толще воды. В личиночном составе ихтиопланктона на долю анчоуса приходилось 16.8 % в вертикальных ловах и 12.2 % в горизонтальных ловах (табл. 2). В толще воды

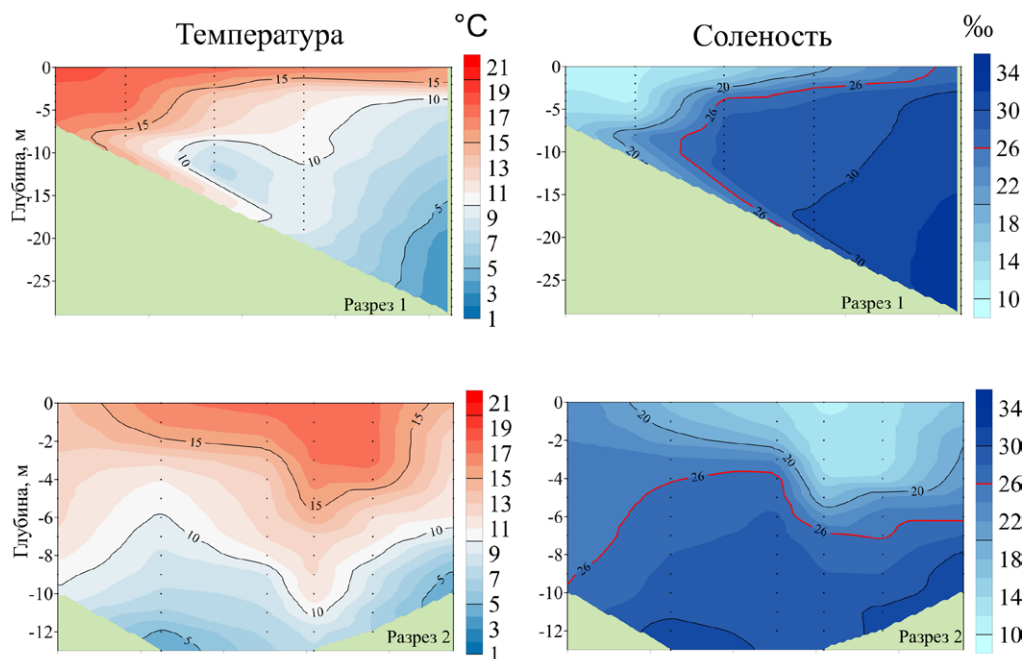


Рис. 3. Вертикальное распределение температуры и солености в юго-восточной части Сахалинского залива в августе 2011 г.
Fig. 3. Vertical distribution of temperature and salinity in the southeastern part of Sakhalin Gulf in August 2011

Таблица 2. Икра и личинки анчоуса в структуре ихтиопланктонных уловов в юго-восточной части Сахалинского залива в августе 2011 г.

Table 2. Japanese anchovy eggs and larvae in the structure of ichthyoplankton catches in the southeastern part of Sakhalin Gulf in August 2011

Показатели	Вертикальные ловы			Горизонтальные ловы		
	экз./м ³ M±sd min-max	Доля, %	ЧВ, %	экз./м ³ M±sd min-max	Доля, %	ЧВ, %
Икра <i>Engraulis japonicus</i>	83.260±213.944 0.200–656.889	94.7	67	20.628±61.930 0.006–223.300	94.2	45
Прочих видов	4.643±11.483 0.104–45.000	5.3	73	1.268±3.084 0.003–10.374	5.8	55
Всего	87.903±212.593 0.710–658.074	100.0	87	21.895±61.567 0.023–223.300	100.0	65
Личинки <i>Engraulis japonicus</i>	0.046±0.093 0.100–0.296	16.8	27	0.009±0.013 0.003–0.050	12.2	50
Прочих видов	0.228±0.337 0.104–1.136	83.2	47	0.062±0.143 0.003–0.600	87.8	70
Всего	0.274±0.386 0.104–1.364	100.0	53	0.071±0.153 0.003–0.650	100.0	70

Примечание. M±sd – среднее значение ± стандартное отклонение; ЧВ – частота встречаемости

Note. M±sd indicates average values ± standard deviation; ЧВ, frequency of occurrence.

личинки анчоуса уступали личинкам желтоперой камбалы, которые формировали почти 70 % от суммарной численности личинок всех видов; в поверхностном слое – личинкам рыбы-лапши и желтоперой камбалы, доля которых достигала 52 % и 27 % соответственно.

В вертикальных ловах частота встречаемости икры анчоуса была достаточно высокой (67 %), личинок – ниже (27 %). В горизонтальных ловах встречаемость личинок (50 %) несколько превышала встречаемость икры (45 %). Концентрации икры анчоуса были более высокими в вертикальных ловах: в среднем 83.3 экз./м³ против 20.6 экз./м³ в горизонтальных. Средняя плотность личинок по данным вертикальных ловов (0.05 экз./м³) также была выше, чем в горизонтальных (около 0.01 экз./м³).

Распределение и развитие икры и личинок анчоуса

При достаточно обширном распространении по акватории, максимальные концентрации икры анчоуса – до 559–657 экз./м³ в вертикальных ловах и до 177–223 экз./м³ в горизонтальных – были сосредоточены

на небольшом участке у северо-восточной границы изученной акватории напротив зал. Байкал (рис. 4 а, б). На остальной площади концентрации икры были меньше на несколько порядков.

Распределение личинок носило несколько иной характер. В районе зал. Байкал концентрации также были незначительно выше, чем на остальной акватории: в вертикальных ловах до 0.3 экз./м³ против 0.1–0.2 экз./м³, а в горизонтальных до 0.03 экз./м³ против 0.003–0.019 экз./м³. Но распределение личинок в целом по акватории было более однородным: различия между максимальными и минимальными значениями в основном находились в пределах одного порядка (рис. 4 с, д).

Икра анчоуса встречалась за пределами 13-метровой изобаты до предельно обследованных глубин. По данным вертикальных ловов нерест, определяемый по локализации икры на I стадии развития, наблюдался в этом же диапазоне глубин. Средняя глубина распространения I стадии составляла 19.6 м. По данным горизонтальных ловов икра на I стадии встречалась в более узком диапазоне – от 13.5 до 20.5 м, в среднем 15.8 м (табл. 3).

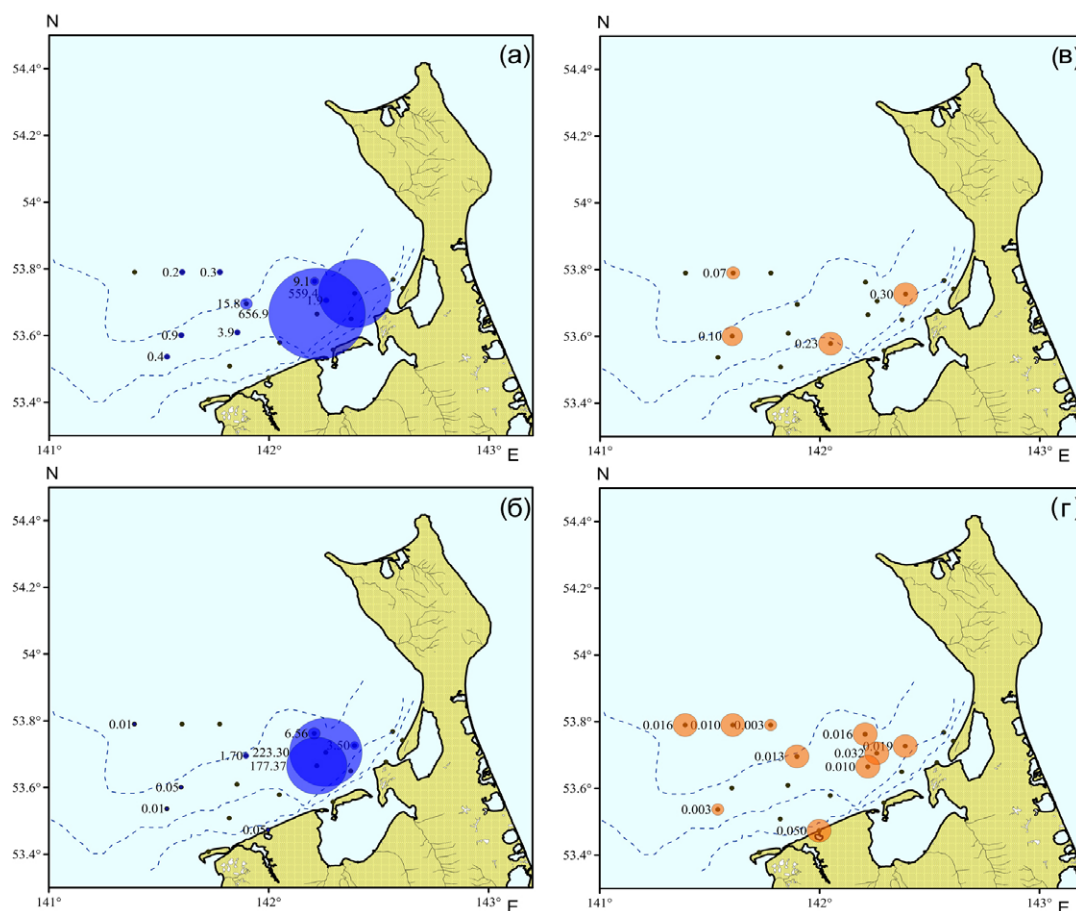
Таблица 3. Условия развития икры и личинок японского анчоуса в юго-восточной части Сахалинского залива в августе 2011 г. (в числителе – среднее значение $\pm$ стандартное отклонение, в знаменателе – предельные значения)**Table 3.** Environment condition for the development of Japanese anchovy eggs and larvae in the southeastern part of Sakhalin Gulf in August 2011 (numerator: average value $\pm$ standard deviation; denominator: limits)

Параметры среды	Вертикальные ловы (слой дно–0 м)			Горизонтальные ловы (поверхностный слой)		
	Икра, I стадия*	Икра вся	Личинки	Икра, I стадия*	Икра вся	Личинки
h , м	19.63 ± 7.21 13.5–31.0	19.05 ± 6.65 13.5–31.0	18.08 ± 9.18 8.8–30.0	15.8 ± 3.22 13.5–20.5	17.54 ± 4.46 13.5–25.5	18.15 ± 9.23 0.5–31.0
T , °C	9.94 ± 2.54 6.23–13.81	10.11 ± 2.31 6.23–13.81	12.27 ± 4.16 7.45–17.57	15.42 ± 1.14 14.09–16.9	15.25 ± 2.11 11.29–18.2	15.52 ± 2.08 11.29–19.25
S , ‰	27.17 ± 3.66 21.31–31.85	26.76 ± 3.37 21.31–31.85	23.58 ± 7.96 12.83–31.85	19.15 ± 2.38 16.37–22.68	19.29 ± 5.18 10.81–28.64	21.51 ± 4.93 16.15–28.64
Tur, FTU	1.47 ± 0.95 0.44–3.04	2.01 ± 1.95 0.44–7.03	1.44 ± 0.87 0.44–2.55	2.66 ± 1.99 1.06–6.49	2.34 ± 1.87 0.31–6.49	2.61 ± 2.92 0.31–9.05
O_2 , мг/л	9.19 ± 0.55 8.57–10.10	9.12 ± 0.51 8.57–10.10	9.57 ± 0.76 8.93–10.51	8.82 ± 0.66 7.71–9.49	8.87 ± 0.58 7.71–9.49	8.92 ± 0.56 7.71–9.49

* является индикатором текущего нереста.

Примечание. h – глубина, T – температура воды, S – соленость, Tur – мутность.

Note. H , indicates depth; T , water temperature; S , salinity; Tur, turbidity.

**Рис. 4.** Распределение (экз./м³) икры анчоуса по данным вертикальных (а) и горизонтальных (б) ловов и личинок по данным вертикальных (в) и горизонтальных (г) ловов в юго-восточной части Сахалинского залива в августе 2011 г.**Fig. 4.** Distribution (eggs/m³) of Japanese anchovy eggs: vertical (a) and horizontal (б) catches, and larvae: vertical (в) and horizontal (г) catches in the southeastern part of Sakhalin Gulf in August 2011.

Температурный диапазон всего слоя в районах нереста был достаточно широким – от 6.2 до 13.8 °С при средней величине 9.9 °С. Минимальная глубина, на которой были обнаружены личинки при вертикальных обловах, составляла 8.8 м. В поверхностном слое икра на I стадии встречалась при температуре от 14.1 до 16.9 °С (в среднем 15.4 °С), личинки – в более широком диапазоне при температуре 11.3–19.3 °С (в среднем 12.3 °С). По данным горизонтальных ловов личинки встречались вплоть до уреза воды.

Соленость в местах обнаружения икры на I стадии в среднем составляла 27.2 ‰ при вариациях данного показателя от 21.3 до 31.9 ‰. Икра на всех стадиях была отмечена в таком же диапазоне солености при незначительно меньшей средней величине – 26.8 ‰. Диапазон солености для личинок был несколько шире – от 12.8 до 31.85 ‰ (в среднем 23.6 ‰). В поверхностном слое раннее развитие икры протекало преимущественно при эстуарных величинах солености ниже критической величины 26 ‰. Икра на I стадии встречалась в диапазоне от 16.4 до 22.7 (в среднем 19.2 ‰). Личинки облавливались на участках с соленостью до 28.6 ‰.

Нерест, определяемый по распространению I стадии, происходил при невысоких значениях мутности – в среднем 1.47 FTU в слое дно–0 м и 2.66 FTU в поверхностном слое. Максимальная мутность в местах нереста составляла 7.0 FTU, содержание кислорода не опускалось ниже 7 мг/л.

Участки экстремально высоких концентраций икры были сильно ограничены как диапазоном глубин, так и параметрами среды. В вертикальных ловах 96 % икры было сосредоточено на двух станциях, расположенных над глубиной 13.5 м (рис. 5 а). В горизонтальных ловах 97 % икры также было локализовано на двух станциях над глубинами 13.5–14.5 м (рис. 5 б).

Высокая плотность икры в вертикальных и горизонтальных ловах совпадала только на станции 27. На ст. 25, при высокой плотности икры в толще воды, в поверхностном слое ее величина многократно снижалась. На ст. 26 была отмечена обратная ситуация с высокими концентрациями икры в поверхностном слое и очень низкими в толще воды. Как в толще воды (ст. 25 и 27), так и в поверхностном слое (ст. 26 и 27) на двух станциях с максимальными концентрациями преобладала икра на I стадии развития, на долю которой приходилось 97 %

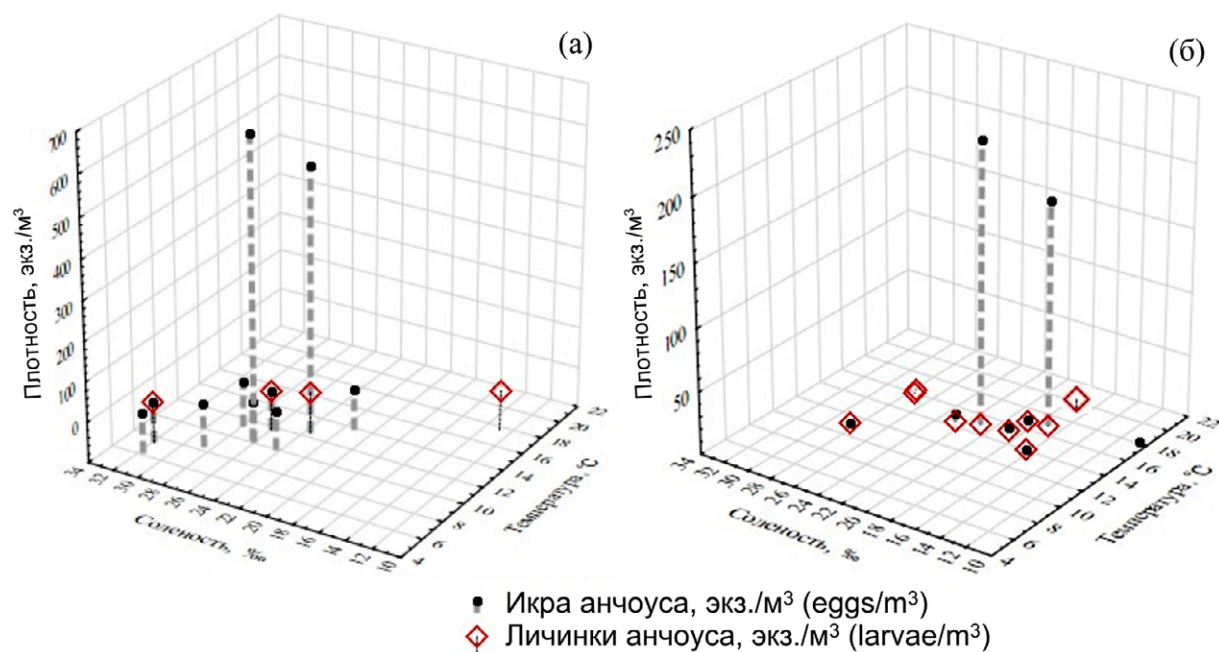


Рис. 5. Распределение икры и личинок анчоуса в зависимости от средней температуры и солености в вертикальных (а) и горизонтальных (б) ловах.

Fig. 5. Distribution of Japanese anchovy eggs and larvae depending on average temperature and salinity in the vertical (a) and horizontal (b) catches.

от всей икры, что указывало на приоритетное значение данного участка для нереста анчоуса.

Для станций с максимальными концентрациями икры было характерно постепенное изменение солёности и температуры с глубиной (рис. 6). Участок максимальных скоплений икры совпадал с максимальным заглублением теплых вод. До глубины 10 м держалась

температура воды более 8–10 °С, при которой возможен нерест мигрирующих группировок анчоуса [17]. Содержание кислорода было стабильным – в пределах 8–10 мг/л. Мутность до глубины 8–10 м имела невысокие значения – до 2 FTU. Глубже происходило незначительное увеличение мутности, что могло быть связано с оседанием и накоплением органики.

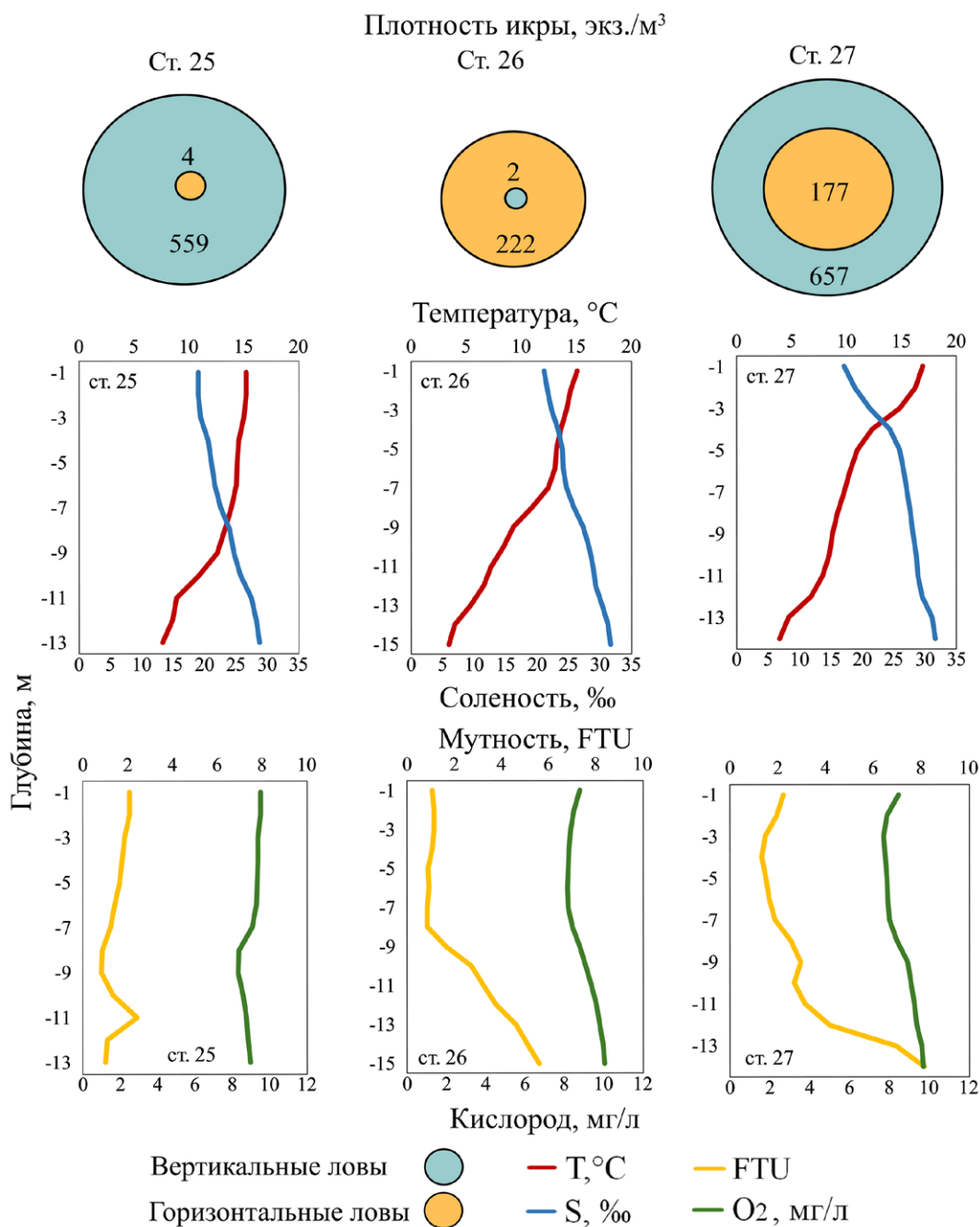


Рис. 6. (Верхняя панель) Плотность (экз./м³) по данным вертикальных и горизонтальных ловов. Ниже вертикальные профили изменения параметров среды на станциях с максимальными концентрациями икры анчоуса.

Fig. 6. (Upper panel) The density of eggs (eggs/m³) in vertical and horizontal catches. Below are vertical profiles of change of environmental parameters at the stations with maximum concentrations of anchovy eggs.

Особенности раннего развития анчоуса

Икра на I стадии развития преобладала не только в местах высоких концентраций, но и на всей акватории в целом, что указывало на активно текущий нерест анчоуса. В горизонтальных ловах доля икры на I стадии была незначительно меньше, чем в толще воды, – 79.5 и 84.8 % соответственно, а доля икры на II стадии несколько больше – 20.4 и 14.8 % соответственно, что связано с ускоренным развитием в более прогретом поверхностном слое. Суммарно на первые две стадии развития приходилось 99.9 % нормально развивавшейся икры в поверхностном слое и 99.6 % в толще воды. Доля III стадии была очень мала, IV стадия в уловах отсутствовала. Доля нежизнеспособных икринок в период исследований находилась на низком уровне – от 0.7 % у поверхности до 4.4 % в толще воды, что для икры анчоуса является очень низким показателем.

Кроме икры, в уловах присутствовали личинки анчоуса. Размерный ряд личинок был достаточно протяженным – от 4.3 до 18.4 мм и полимодальным, что свидетельствовало о давно начавшемся нересте. Преобладали две размерные группы – 7–8 мм и 9–10 мм, на каждую из которых приходилось примерно по 20 % суммарной численности личинок. Среди личинок длиной более 12 мм выделялась размерная группа 13.1–14 мм (рис. 7). Размерная группа 18.1–18.4 мм включала особей на ста-

дии метаморфоза – перехода к мальковой фазе развития.

Зависимость распределения икры и личинок анчоуса от факторов среды

В толще воды (слой дно–0 м) отмечено снижение плотности икры на I стадии с увеличением глубины. Высокие значения ранговой корреляции Спирмена ($>0,9$) получены для I и II стадий и мертвой икры, что указывало на сосредоточение их в единых скоплениях и слабый разнос с мест основного нереста. Достоверная корреляция между плотностью икры, температурой, мутностью и соленостью отсутствовала, но между параметрами среды корреляция была статистически значимой. Средняя температура тотального слоя и мутность снижались по мере увеличения глубины, соленость – возрастала. Доля нежизнеспособных икринок в целом уменьшалась по мере увеличения солености.

Для горизонтальных ловов достоверная корреляция между плотностью икры и глубиной места в районе отбора не выявлена. Высокие значения коэффициента корреляции ($>0,9$), как и в толще воды, были отмечены для I и II стадий и мертвой икры. Плотность икры на I стадии снижалась с увеличением мутности. Связь плотности икры и личинок на станциях с другими параметрами среды не обнаружена (табл. 4).

Каждый фактор включает несколько связанных параметров, которые влияют на плотность икры. Вычленив один из параметров среды, оказывающий преимущественное влияние на распределение икры и личинок анчоуса, в данном случае не удалось. По итогам факторного анализа рассматриваемые переменные формируются в две группы факторов (фактор 1 и фактор 2), объясняющих 89 % дисперсии в поверхностном слое и 100 % дисперсии в слое дно–0 м (табл. 5).

В слое дно–0 м фактор 1 отражал агрегированность икры на локальном участке, обусловленную массовым локальным нерестом анчоуса в рассматриваемом районе. Из параметров среды наибольшее влияние на распределение икры оказывали глубина, мутность и содержание кислорода. В факторе 2 выделялись температура и соленость, влияние которых было более значимым для икры на III стадии развития (табл. 6).

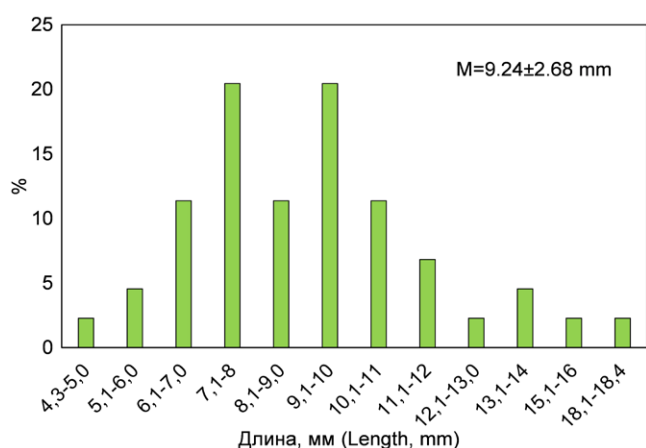


Рис. 7. Размерный состав личинок анчоуса в юго-восточной части Сахалинского залива в августе 2011 г. (M – среднее значение $\pm$ стандартное отклонение).

Fig. 7. Size composition of Japanese anchovy larvae in the south-eastern part of Sakhalin Gulf in August 2011. (M, mean value $\pm$ standard deviation).

Таблица 4. Достоверные значения ранговой корреляции Спирмена между плотностью икры на ранних стадиях развития и основными параметрами среды ($p < 0.05$)**Table 4.** Significant values of Spearman's rank correlation for Japanese anchovy eggs and main environmental parameters ($p < 0.05$)

Горизонт	Поверхностный слой (surface layer)							
Дно–0 (bottom–0)	Показатель	I	II	D	h	T	S	Tur
	I		0.94					–0.83
	II	0.90		0.90				
	D		0.90					
	h	–0.75					0.61	
	T				–0.65		–0.69	
	S			–0.90	0.84	–0.89		–0.86
	Tur				–0.88		–0.71	

Примечание. Правая часть матрицы – значения для поверхностного слоя, левая – для слоя дно–0. I, II – стадии развития икры; D – нежизнеспособная икра; остальные условные обозначения см. табл. 3.

Note. The right part of the matrix contains values for the surface layer; the left part of the matrix, values for the layer from the bottom to the surface. I, II, eggs stages; D, dead eggs; see other symbols in Table 3.

Таблица 5. Результаты факторного анализа по выявлению параметров среды, влияющих на распределение икры и личинок анчоуса в юго-восточной части Сахалинского залива**Table 5.** Results of the first stage of factor analysis to identify environmental parameters affecting the distribution of Japanese anchovy eggs and larvae in the southeastern part of Sakhalin Gulf

Фактор	Собственное значение	Степень влияния фактора на полную дисперсию, %	Накопленная степень влияния факторов на полную дисперсию, %
Слой дно–0 м			
1	6.08	67.53	67.53
2	2.92	32.47	100.00
Поверхностный слой			
1	5.05	56.16	56.16
2	2.94	32.61	88.77

Таблица 6. Матрица факторных нагрузок, объясняющих больше 70 % дисперсии (выделены действующие переменные)**Table 6.** Matrix of factor loadings that explain more than 70 % of the variance (active variables are highlighted)

Переменные	Слой дно–0 м		Поверхностный слой	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
Икра, I стадия	–0.989	–0.151	0.976	–0.072
Икра, II стадия	–0.976	0.220	0.943	0.246
Икра, III стадия	–0.689	0.725	Низкая плотность	
Икра, мертвая	–0.968	–0.252	0.976	–0.131
Личинки	Низкая плотность		0.896	–0.336
h, м	0.959	–0.283	–0.690	–0.067
T, °C	0.237	0.971	0.151	0.968
S, ‰	0.606	–0.796	–0.176	–0.941
Tur, FTU	–0.928	–0.372	–0.420	0.896
O ₂ , мг/л	0.729	0.684	–0.867	–0.330
Общая дисперсия	6.077	2.923	5.055	2.935
Доля общей дисперсии	0.675	0.325	0.562	0.326

В поверхностном слое из параметров среды на распределение икры и личинок анчоуса основное влияние оказывали содержание кислорода, температура, соленость и мутность. Также выявлена связь скоплений личинок анчоуса со скоплениями икры, что указывает на длительное пребывание личинок в местах основного нереста.

Поскольку в уловах в целом и в местах экстремально высоких концентраций доминировала недавно выметанная икра анчоуса на I стадии развития, продолжительность развития которой составляет около часа, полученные результаты фактически показывали связь нерестилищ анчоуса с определенными параметрами среды. Выбор мест нереста производителями осуществлялся исходя из оптимального сочетания температуры, солености, мутности и содержания кислорода, которые в суровых условиях северной части ареала должны были быть близкими к оптимальным величинам. Большинство перечисленных параметров коррелировало между собой (см. табл. 3), поскольку в данном районе они связаны общим происхождением и достаточно четко определяют амурские или охотоморские воды. Значения этих параметров в местах массового нереста анчоуса, определяемых по экстремально высоким концентрациям икры, были близки к показателям трансформированного амурского стока. Нахождение личинок и икры на I–III стадиях развития в совместных скоплениях было следствием их удержания в пределах зон нереста, связанных с антициклоническим круговоротом, что обеспечивало ранний онтогенез анчоуса в наиболее оптимальных условиях.

Обсуждение

Результаты исследований нереста анчоуса в присахалинских водах позволяют увидеть сходные черты с его воспроизводством в центральных частях ареала. Как и в водах Китая, Японии и Южной Кореи [2], у побережья о. Сахалин обнаружены шельфовые нерестилища над глубинами более 100 м в Татарском проливе и прибрежные нерестилища над глубинами менее 20–30 м в Татарском проливе, в зал. Анива и у юго-восточного побережья Сахалина [23–26, 54].

Одно из основных прибрежных нерестилищ анчоуса с высокой плотностью икры связано с эстуарной системой крупнейшей реки дальневосточного бассейна – Амур, внешней частью которой является мелководный Сахалинский залив [8], отличающийся хорошим прогревом в летний период [55], образованием апвеллингов и фронтальных зон с градиентами гидрохимических, гидрофизических, гидробиологических показателей [56] и высокой продуктивностью [43, 57], необходимыми для воспроизводства вида [2, 58, 59].

Судя по численности икры, являющейся показателем интенсивности нереста рыб [60], наиболее оптимальное сочетание необходимых для икрометания анчоуса условий формировалось в юго-восточной части Сахалинского залива, по сложной гидродинамике, пониженным значениям солености, значительным выносам взвешенных веществ и высокому содержанию хлорофилла *a* [41, 44, 46, 61] сходной с условиями нереста анчоуса в эстуариях крупных рек Желтого и Восточно-Китайского морей.

Исследования в 2011 г. были выполнены в период потепления вод Амурского лимана, влияющих на температурный режим юго-восточной части Сахалинского залива [40], высокой численности японского анчоуса и его массовых миграций в северном направлении, в том числе к берегам о. Сахалин [5, 10]. Анчоус массово появляется у берегов Сахалина в июле–августе при максимальном прогреве [10], что уже предполагает выбор наиболее подходящего для нереста температурного режима. Далее в пределах широкого диапазона условий происходит поиск участков с наиболее оптимальными условиями, которые должны подходить как для нереста, так и для нагула. Северные миграции анчоуса вдоль западного побережья Сахалина в отдельные годы простираются вплоть до 54–55° с.ш. [62], вдоль восточного побережья – до 53° с.ш. Эпизодически анчоус достигает восточного побережья Камчатки [10].

Концентрации выметанной икры в юго-восточной части Сахалинского залива превышали аналогичные величины в центральных частях ареала. В основных скоплениях численность икринок, пересчитанная на 100 м пути, достигала 6432–9448 и 7552–8868 экз./м².

В Желтом море при облове сетью аналогичного диаметра численность икры анчоуса до 1079 икринок на 100 м пути отмечали локально, но в течение длительного времени – с мая по июль, при пике нереста в мае–июне [2]. В прибрежных водах Корейского полуострова максимальная численность икры анчоуса редко превышала 1000 экз./м² [12]. Если рассматривать интенсивность нереста анчоуса в северной части ареала, то по концентрациям икры в толще воды (в среднем 83 экз./м³, максимум 657 экз./м³) юго-восточная часть Сахалинского залива уступала только нерестилищам зал. Анива, где соответствующие величины достигали 400 и 2634 экз./м³ [24]. В северо-восточной части Сахалинского залива численность икры была многократно ниже, чем в юго-восточной, – в среднем 0.003–0.005 экз./м³ [62], что также подтверждает связь основных нерестилищ анчоуса с трансформированным амурским стоком.

Учитывая, что в период исследований икра на I стадии развития доминировала как на всей обследованной акватории, так и в скоплениях с максимальной плотностью, вся юго-восточная часть Сахалинского залива в разной степени являлась местом нереста анчоуса. Вымет большого количества икры в короткие сроки является частью компенсаторного механизма мигрирующих популяций [17], позволяющего получить многочисленное потомство у северных границ ареала при сокращении нерестового периода до одного-двух месяцев и обеспечить возможность миграций сеголетков в южном направлении. В зал. Анива, по сравнению с зал. Петра Великого (Японское море), близкие концентрации личинок достигались увеличением численности икры на порядок [24].

По данным единственной съемки невозможно установить истинный вклад исследованной части Сахалинского залива в общий объем воспроизводства анчоуса. Из-за суровых условий, короткого нерестового периода, длительности миграций в места зимовки преждевременно говорить, что этот район может обеспечить высокую численность ежегодного пополнения вида. Тем не менее, обширное распространение и высокие плотности икры

анчоуса в 2011 г., а также ранее обнаруженные скопления личинок, перемещающихся в южном направлении через прол. Невельского [23], указывают на высокую репродуктивную значимость северных акваторий в целом и юго-восточной части Сахалинского залива в частности. В начале XXI столетия нерест анчоуса в этих районах происходил регулярно, выживаемость икры и личинок была достаточно высокой даже в более холодные по термическим характеристикам 2001–2002 гг. [40]. К сожалению, исследования в этих районах чрезвычайно редки и проследить многолетнюю динамику нереста анчоуса не представляется возможным. Надо полагать, что воспроизводство анчоуса в данном районе не может глобально повлиять на запасы этого короткоциклового вида, которые все же сосредоточены в юго-восточной Азии и подвержены значительным колебаниям не только по естественным причинам, но и в результате значительной промысловой нагрузки. Но уже то, что анчоус достигает нерестилищ Сахалинского залива минуя другие районы и массово здесь размножается, свидетельствует о привлекательности данной акватории для этого вида как места с подходящими условиями среды и обильной кормовой базой как для производителей, так и для личинок и подрастающей молодежи.

Абсолютное доминирование в юго-восточной части Сахалинского залива икры анчоуса на I стадии позволяет поставить знак равенства между распределением икры и локализацией нерестилищ. Таким образом, анализ распределения плотности икры в зависимости от внешних параметров фактически показывает влияние условий среды на расположение нерестилищ анчоуса. В юго-восточной части Сахалинского залива по температуре, солености, мутности, содержанию кислорода достаточно хорошо идентифицируются охотоморские и трансформированные амурские воды, а также и сток с заливов в прибрежной зоне. Максимальные скопления икры на I стадии, являющиеся индикатором расположения нерестилищ, были связаны с антициклоническим круговоротом, образующимся в зоне действия трансформированного амурского стока. При проведении факторного анализа

не удалось из комплекса взаимосвязанных параметров среды выделить определенный показатель, влияющий на расположение зон массового нереста. Выбор мест нереста в период исследований 2011 г. происходил в градиенте всех анализируемых показателей – температуры, солености, мутности и содержания кислорода, оптимальные величины которых формировались в узком диапазоне глубин.

Массовое икрометание анчоуса наблюдалось за пределами сильно опресненных районов, находящихся под влиянием амурского и берегового стоков, но в пределах участков с благоприятным температурным и кислородным режимом и невысокими величинами мутности. Температуры в зоне основного икрометания находились в пределах оптимума 10–12 °С в среднем в слое дно–0 м и 15.1–16.9 °С в поверхностном слое. Средняя соленость в вертикальном столбе воды (23.6–26.2 ‰) имела приграничные значения, разделяющие эстуарные и морские биологические комплексы. В поверхностном слое развитие икры и личинок анчоуса протекало и в водах с эстуарной соленостью 17.2–21.1 ‰ [52, 53]. Но в целом эти величины попадали в диапазон солености, при котором происходит развитие икры анчоуса в эстуарных системах Желтого моря и Восточно-Китайского морей [11, 29].

Антициклонический круговорот в местах массового нереста, определяемый по заглуплению теплых вод, способствовал удержанию икры и личинок анчоуса в оптимальных условиях [46]. Небольшие глубины (13–15 м) обеспечивали равномерное вертикальное распределение параметров среды до глубин 10 м. Содержание кислорода достигало 10–12 мг/л, мутность не превышала 2 FTU. Вероятность значительных колебаний температуры, солености и других анализируемых показателей, губительных для рыб на ранних стадиях развития, снижалась за счет удаленности основных нерестилищ от мест воздействия холодных охотоморских вод и участков с сильными течениями и прибойностью, расположенных на выходе из Амурского лимана, вблизи проливов прибрежных лагун и в прибрежной полосе [48]. С другой стороны, благодаря незначительной удаленности нерестилищ от зон активной

гидродинамики с высокой продуктивностью планктонных и бентосных сообществ [48, 57], участки с хорошей кормовой базой становились доступными для нагула личинок анчоуса по мере их роста и увеличения плавательной активности. Образование высокой плотности икры в пределах относительно небольшой акватории является следствием стайного поведения анчоуса и, вероятно, ограниченной площади с оптимальными параметрами среды в условиях взаимодействия очень холодных охотоморских вод и теплых, но сильно опресненных амурских вод. Распределение икры анчоуса в виде локальных «пятен» с очень высокой плотностью характерно не только для юго-восточной части Сахалинского залива, но и для центральных частей ареала [28].

Таким образом, район массового икрометания находился в зоне с подходящими температурными условиями, хорошим кислородным режимом и невысокими значениями мутности. Места с максимальными концентрациями икры, зарегистрированными на ст. 27, совпадали с участком наиболее высокой численности бентосных фораминифер [61], скопления которых образуются в условиях отсутствия волнения и сильных течений [63]. Кроме того, акватория массового нереста анчоуса граничила с высокопродуктивным районом вблизи зал. Байкал, характеризующимся повышенными биомассами фитопланктона и содержанием хлорофилла *a*. Интенсивное продуцирование микроводорослей поблизости от проливов зал. Байкал является результатом постоянного поступления биогенов, запасы которых содержатся в придонном слое холодных морских вод [57].

В зависимости от существующих условий в районах нереста влияние температуры и солености на распределение икры и личинок анчоуса может меняться. В юго-восточной части Сахалинского залива температура оказывала положительное, а соленость отрицательное влияние на распределение икры и личинок анчоуса, поскольку зона температурного оптимума была ограничена прибрежной полосой и распространением трансформированного амурского стока. В эстуарных системах субтропической части ареала соленость, напро-

тив, обычно оказывает положительное влияние на выбор мест нереста, а температура – отрицательное, так как часто превышает оптимальную для эмбрионального развития анчоуса величину [11, 29].

Судя по невысокому уровню гибели икры (0.7–4.4 %) и обширному распространению разновозрастных личинок, пониженные значения солености не были критичными для ранних стадий анчоуса. Полученные величины гибели икры значительно уступали уровню ее элиминации в других районах. В Желтом и Восточно-Китайском морях естественная эмбриональная гибель может превышать 70–80 %, а в отдельные годы достигать 90 % [49]. Высокий уровень гибели икры – до 70–100 % отмечен и в Японском море в зал. Петра Великого [21, 22]. В зал. Терпения во время прохождения глубокого циклона все икринки и личинки анчоуса были мертвыми. В суровых условиях шельфовых вод северо-восточного Сахалина суммарная доля погибших и аномально развивавшихся икринок анчоуса варьировала от 33 до 100 %. В восточной части Татарского пролива она достигала 67 % и снижалась до 14 % у северо-западного побережья в зал. Чихачева и до 4 % в зал. Анива [23]. При резких изменениях параметров среды и погодных условий в Сахалинском заливе также можно ожидать значительных колебаний выживаемости икры. Из-за ограниченного времени исследований в данной работе оценить окончательную смертность в эмбриональный и личиночный период не представляется возможным.

Развитие личинок анчоуса происходило на обширной части исследованной акватории, тем не менее, более высокая встречаемость наблюдалась в зоне массового нереста анчоуса. Вариации численности личинок в целом были значительно меньше, чем икры. В первую очередь это связано с их элиминацией и перераспределением по мере развития и роста. Несмотря на высокие скорости течений и направленность стокового Амурского течения с юга на север [45], развитие большей части личинок, очевидно, происходит в наиболее благоприятных условиях юго-восточной части залива в пределах антициклонической циркуляции, способству-

ющей удержанию пассивных объектов [46]. Это предположение подтверждается снижением средней численности личинок в северо-восточной части залива [62] и присутствием разновозрастных особей в юго-восточной части. Личинки анчоуса встречались вплоть до уреза воды при значительных вариациях параметров среды. На мелководных участках личинок анчоуса облавливали в условиях повышенной до 9 FTU мутности.

Протяженный полимодальный размерный ряд является следствием развития личинок, появившихся в разные сроки. Преобладание нескольких размерных групп объясняется наличием характерных для анчоуса интервалов между икрометаниями [15] и, вероятно, подходами новых мигрирующих группировок, как это происходит в центральных частях ареала [2, 18]. Темп роста личинок в первые дни после выклева составляет в среднем 0.6–0.8 мм в сутки [19, 64, 65], возрастает при увеличении температуры и снижается в популяциях, нерестящихся севернее [36]. Если принять за темп суточного роста личинок в юго-восточной части Сахалинского залива минимальную величину 0.6 мм и длину при выклеве 3 мм [66], то наиболее крупные личинки анчоуса длиной 18.0 мм и более, выловленные в Сахалинском заливе, появились ориентировочно в конце июля, а преобладающие особи длиной от 8 до 10 мм – в начале августа. В зависимости от температуры, эмбриональное развитие продолжается 42–72 ч [67]. Таким образом, икрометание анчоуса в Сахалинском заливе началось ориентировочно в третьей декаде июля, массовый нерест происходил в августе. В сентябре на прилежащих участках (прол. Невельского) икра анчоуса в ихтиопланктоне отсутствовала [23], поэтому икрометание, очевидно, завершается в сентябре, что предполагает общую продолжительность нереста около 1.5 мес. По сравнению с субтропической зоной, где нерест может длиться до 8 мес. и более [19], это довольно короткий период.

Факторный анализ подтвердил агрегированность икры и личинок в общих скоплениях и воздействие на их распределение сложного комплекса факторов. В толще воды к основным факторам в порядке значимости относились

глубина, мутность, содержание кислорода, температура и соленость. В поверхностном слое основное воздействие оказывали содержание кислорода, температура, соленость и мутность.

Температура и соленость как в толще воды, так и в поверхностном слое действовали на распределение икры однонаправленно. С увеличением температуры плотность икры возрастала, с ростом солености снижалась. Такое действие объяснялось распределением трансформированного амурского и берегового стоков, хорошо заметных по распределению мутности и содержания кислорода (см. рис. 2). Вблизи зал. Байкал воды разного происхождения могут смешиваться. В градиенте трансформированных вод оптимальный для нереста режим формировался на расстоянии более 10 км от проходов зал. Байкал и более 36 км от входа в Амурский лиман. Поскольку мутность, соленость и температура имели высокую корреляцию с глубиной, действие всех многочисленных факторов можно рассматривать как совместное.

В отличие от температуры и солености, действие мутности и кислорода в поверхностном слое, по сравнению с толщей воды, менялось на противоположное. В толще воды с увеличением содержания кислорода и снижением мутности численность икры анчоуса возрастала, в поверхностном слое, напротив, снижалась. Такой характер воздействия может быть связан с распределением теплых амурских вод в поверхностном слое, где мутность увеличивается, а содержание кислорода, соответственно, снижается. Но поскольку нерест анчоуса все же больше привязан к температурным условиям, негативного влияния мутности, очевидно, не удастся избежать.

Учитывая, что на величину мутности влияет содержание как минеральной взвеси, так органики, в том числе плотность фитопланктона и зоопланктона, ее воздействие можно рассматривать как совокупное от содержания взвешенных веществ и планктона. В юго-восточной части Сахалинского залива влияние мутности соответствовало влиянию содержания ВВ в эстуарных зонах юго-восточной Азии, где данный показатель входил в комплекс основных

факторов, структурирующих расположение нерестовых и выростных зон анчоуса в градиенте параметров пресноводного стока крупных рек. Если основной нерест в эстуарии р. Янцзы (Желтое море) происходил у внешней границы эстуарной зоны при среднем содержании ВВ 5.1 мг/л [11], то личинки анчоуса больше тяготели к прибрежным участкам, где содержание взвеси могло достигать 134.8 мг/л, что указывало на их большую устойчивость к ее высоким концентрациям [32]. Выявленная позитивная реакция личинок старших возрастов на увеличение мутности может быть, предположительно, связана с поиском богатых кормовых районов [68]. В водах Сахалинского залива мутность, кроме того, может являться ориентиром для обратных миграций подрастающей молодежи, численность которой высока в прол. Невельского в осенний период [23].

Без послонных ловов точная глубина погружения икры анчоуса в Сахалинском заливе остается неизвестной. Судя по значительным различиям в численности, наблюдаемым в вертикальных и горизонтальных ловах на одних и тех же станциях с максимальными концентрациями икры, горизонт ее вымета несколько менялся. Исследования в Восточно-Китайском море показали, что высокие концентрации икры анчоуса образуются в приповерхностном 15-метровом слое [69]. Очевидно, что в юго-восточной части Сахалинского залива в местах массового нереста с глубинами не более 15 м, где отсутствует стратификация, икра анчоуса также могла быть распределена по всему вертикальному слою, что подтверждается более высокими средними концентрациями икры в вертикальных ловах (83 экз./м³) по сравнению с горизонтальными (21 экз./м³). Аналогичные закономерности были выявлены ранее и в северо-западной части Сахалинского залива [62]. Соответственно, связи скопления икры анчоуса с параметрами среды, полученные по данным вертикальных ловов, можно принять как основные, влияющие на выбор мест нереста этого вида. В то же время нельзя исключать и высокую мозаичность распределения икры при малой площади нереста, что могло приводить к несовпадению уловов, полученных в вертикальных и горизонтальных ловах.

Выводы

Сахалинский залив является одним из наиболее удаленных от основных центров воспроизводства северных нерестилищ японского анчоуса в Охотском море.

В августе 2011 г. в юго-восточной части залива наблюдался интенсивный нерест анчоуса, определяемый по высокой относительной численности икры на I стадии – 84.8 % в толще воды и 79.5 % в поверхностном слое. Средняя плотность икры – 83 экз./м³ в толще воды и 21 экз./м³ в поверхностном слое – превышала концентрации икры в морях юго-восточной Азии и была сопоставима с концентрациями в зал. Анива.

Личинки встречались во всем обследованном диапазоне глубин – от уреза воды до 31 м. Длина личинок варьировала от 4.3 до 18.4 мм. Протяженный полимодальный размерный ряд являлся следствием развития в районе личинок, появлявшихся в разные сроки. Учитывая длительность эмбрионального развития и скорость роста личинок анчоуса, начало его нереста в Сахалинском заливе пришлось на третью декаду июля.

При обширном распределении икры по акватории скопления с высокой плотностью формировались на ограниченных участках с глубинами 13–15 м и благоприятными условиями среды вблизи наиболее продуктивных прибрежных районов. Участок максимальных скоплений икры совпадал с заглублением вод с температурой 8–10° С и более (при которой возможен нерест мигрирующих группировок анчоуса) до горизонта 10 м. В этом слое наблюдалось стабильное содержание кислорода в пределах 10–12 мг/л и невысокая мутность – до 2 FTU. Соленость в толще воды (23.6–26.2 ‰) оставалась близкой к критической границе, разделяющей морскую и эстуарную зоны, в поверхностном слое имела эстуарные величины (17–21 ‰).

Как и в центральных частях ареала, в юго-восточной части Сахалинского залива определяющим в выборе мест нереста являлся хороший прогрев при комфортных величинах солености, мутности и содержания кислорода в градиенте пресноводного стока р. Амур. Анчоус избегал районов вторжения холодных

охотоморских вод, сильно опресненных амурских вод и районов действия береговых стоков с мутностью более 7 FTU и соленостью менее 10 ‰. Удержанию икры и личинок в благоприятных условиях в течение длительного срока способствовал антициклонический круговорот, выявлявшийся по заглублению трансформированного амурского стока в местах основных концентраций икры и личинок.

Результаты исследования нереста анчоуса в Сахалинском заливе служат еще одним доказательством пластичности и высокой адаптивности этого вида. У северных границ ареала развитие икры и личинок анчоуса происходит в широком диапазоне температуры и солености, что подтверждает его эвритермность и эвригалинность.

Следует учитывать, что полученные результаты ограничены однократной съемкой, выполненной в 2011 г. Для получения более полной картины нереста анчоуса и подтверждения его связи в репродуктивный период с трансформированным амурским стоком требуются дополнительные исследования в Сахалинском заливе и в прилежащих районах.

Список литературы

1. Liu S., Liu Y., Alabia I.D., Tian Y., Ye Z., Yu H., Li J., Cheng J. **2020**. Impact of climate change on wintering ground of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) using marine geospatial statistics. *Frontiers in Marine Science*, 7: 604. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00604>.
2. Zhang W., Yu H., Ye Zh., Tian Y., Liu Y., Li J., Xing Q., Jiang Y. **2021**. Spawning strategy of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the coastal Yellow Sea: Choice and dynamics. *Fisheries Oceanography*, 30(4): 366–381. <https://doi.org/10.1111/fog.12523>
3. Chen X., Liu Q., Yin F. **2023**. Evaluation of Yellow Sea anchovy (*Engraulis japonicus*) fishery for management strategies using a data-limited management toolkit. *Heliyon*, 9(7), e18058, 11 p. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18058>
4. Fellatami K., Zhang W., Zhang C., Liu S., Tian Y. **2024**. Age and growth of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*, Temminck & Schlegel, 1846) in coastal waters around Shandong Peninsula, China. *Fishes*, 9(4), 124. <https://doi.org/10.3390/fishes9040124>
5. Байталюк А.А., Радченко В.И. **2024**. Современное состояние и тенденции промыслового запаса японского анчоуса *Engraulis japonicus* (Engraulidae) в российских водах Японского

- моря. *Известия ТИНРО*, 204(2): 257–275. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2024-204-257-275>
6. Колпаков Н.В., Никитин В.Д. **2023а**. Состав и количественные характеристики сообществ рыб прибрежной зоны внешнего эстуария реки Амур. I. Пролив Невельского. *Результаты Второй Амурской экспедиции. Т. 2: Труды СахНИРО*, 19(2): 3–22.
7. Колпаков Н.В., Никитин В.Д. **2023б**. Состав и количественные характеристики сообществ рыб прибрежной зоны внешнего эстуария реки Амур. II. Амурский лиман. *Результаты Второй Амурской экспедиции. Т. 2: Труды СахНИРО*, 19(2): 23–35.
8. Колпаков Н.В., Никитин В.Д., Живоглядов А.А., Прохоров А.П. **2023**. Состав и количественные характеристики сообществ рыб прибрежной зоны внешнего эстуария реки Амур. III. Сахалинский залив. *Результаты Второй Амурской экспедиции. Т. 2: Труды СахНИРО*, 19(2): 36–51.
9. Великанов А.Я. **2004**. О состоянии сообщества пелагических рыб у западного и восточного Сахалина в 2002 г. *Известия ТИНРО*, 137: 207–225.
10. Великанов А.Я., Мухаметов И.Н., Шевченко Г.В., Заварзина Н.К. **2025**. Биологическая характеристика японского анчоуса *Engraulis japonicus* (Engraulidae) в период сезонных миграций у берегов о. Сахалин в 2000–2023 гг. *Вопросы рыболовства*, 26(1): 59–76. <https://doi.org/10.36038/0234-2774-2025-26-1-59-76>
11. Zhang H., Xian W., Liu S. **2015**. Ichthyoplankton assemblage structure of springs in the Yangtze Estuary revealed by biological and environmental visions. *PeerJ*, 3: e1186. <https://doi.org/10.7717/peerj.1186>
12. Kim J.Y., Lee J.B., Suh Y.-S. **2020**. Oceanographic indicators for the occurrence of anchovy eggs inferred from generalized additive models. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 23, 19. <https://doi.org/10.1186/s41240-020-00161-y>
13. Fujita T., Yamamoto M., Kono N., Tomiyama T., Sugimatsu K., Yoneda M. **2021**. Temporal variations in hatch date and early survival of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in response to environmental factors in the central Seto Inland Sea, Japan. *Fisheries Oceanography*, 30(5): 527–541. <https://doi.org/10.1111/fog.12535>
14. Kawaguchi K., Yamashita Y., Hayashi A. **1990**. Some aspects of spawning of the reared Japanese anchovy (*Engraulis japonicus* H.) in relation to the photoperiod water temperature and starvation. *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography*, 54(4): 364–372.
15. Funamoto T., Aoki I., Wada Y. **2004**. Reproductive characteristics of Japanese anchovy, *Engraulis japonicus*, in two bays of Japan. *Fisheries Research*, 70(1): 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2004.06.017>
16. Takasuka A., Oozeki Y., Aoki I. **2007**. Optimal growth temperature hypothesis: Why do anchovy flourish and sardine collapse or vice versa under the same ocean regime? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 64(5): 768–776. <https://doi.org/10.1139/f07-052>
17. Funamoto T., Aoki I. **2002**. Reproductive ecology of Japanese anchovy off the Pacific coast of eastern Honshu, Japan. *Journal of Fish Biology*, 60: 154–169. [doi:10.1006/jfbi.2001.1829](https://doi.org/10.1006/jfbi.2001.1829)
18. Takasuka A., Oozeki Y., Kubota H. **2008**. Multi-species regime shifts reflected in spawning temperature optima of small pelagic fish in the western North Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, 360: 211–217. <https://doi.org/10.3354/meps07407>
19. Zhu Q., Wu R., Masuda Y., Takahashi Y., Okabe K., Koizumi K., Iida A., Katayama S. **2023**. Spawning phenology and early growth of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) off the Pacific coast of Japan. *Fishes*, 8, 11. <https://doi.org/10.3390/fishes8010011>
20. Hayashi A., Goto T., Takahashi M., Watanabe Y. **2019**. How Japanese anchovy spawn in northern waters: start with surface warming and end with day length shortening. *Ichthyological Research*, 66: 79–87. <https://doi.org/10.1007/s10228-018-0652-5>
21. Давыдова С.В. **1994**. Встречаемость икры дальневосточной сардины и японского анчоуса в заливе Петра Великого (Японское море). *Известия ТИНРО*, 115: 130–136.
22. Давыдова С.В., Шевченко А.В. **2002**. Особенности нереста японского анчоуса *Engraulis japonicus* (Engraulidae) в заливе Петра Великого (Японское море) в 1996–1998 гг. *Вопросы ихтиологии*, 42(2): 205–214.
23. Мухаметова О.Н. **2004**. Некоторые особенности пространственного распределения и развития икры и личинок японского анчоуса *Engraulis japonicus* (Engraulidae). *Вопросы ихтиологии*, 44(2): 239–248.
24. Мухаметова О.Н., Мухаметов И.Н. **2013**. Ихтиопланктон прибрежной зоны залива Анива. *Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях: Труды СахНИРО*, 14: 180–197.
25. Moukhametova O.N. **2012**. Ichthyoplankton as an indicator of fish reproduction in Tatarskiy Strait (Japan Sea). In: *Proceedings of the 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu, Hokkaido, Japan, 19–24 February 2012)*, 133–136.
26. Moukhametova O.N. **2014**. Reproductive and nursery potential of nearshore area in the East of Tatarskiy Strait. In: *Proceedings of the 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu, Hokkaido, Japan, 16–19 February 2014)*, 288–291.
27. Moukhametova O.N. **2013**. Seasonal Formation of Ichthyoplankton Complexes in Aniva Bay (Southern Sakhalin). In: *Proceedings of the 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu, Hokkaido, Japan, 17–24 February 2013)*, 62–65.

28. Sekiguchi H., Sugishima H. **1995**. Fine-scale spatial distribution of anchovy eggs in Ise Bay, Central Japan. *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography*, 59(1): 19–31.
29. Yang Y.Y., Zhu M.M., Song Q.Q., Wang X.X., Li F., Zhang X.M., Pang Z.W., Su B. **2024**. The water-sediment regulation scheme on the community structure of ichthyoplankton in the Yellow River estuary. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 48(3): 488–503. <https://doi.org/10.7541/2024.2023.0241>
30. Islam M.Sh., Tanaka M. **2009**. Diet and prey selection in larval and juvenile Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in Ariake Bay, Japan. *Aquatic Ecology*, 43(2): 549–558. <https://doi.org/10.1007/s10452-008-9207-6>
31. Zhang H., Xian W., Liu S. **2016**. Autumn ichthyoplankton assemblage in the Yangtze Estuary shaped by environmental factors. *PeerJ*, 4: e1922. <https://doi.org/10.7717/peerj.1922>
32. Miró J.M., Megina C., Donázar-Aramendía I., Reyes-Martínez M.J., Sánchez-Moyano J.E., García-Gómez J.C. **2020**. Environmental factors affecting the nursery function for fish in the main estuaries of the Gulf of Cadiz (south-west Iberian Peninsula). *Science of the Total Environment*, 737: 139614. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139614>
33. Arevalo E., Cabral H.N., Villeneuve B., Possémé C., Lepage M. **2023**. Fish larvae dynamics in temperate estuaries: A review on processes, patterns and factors that determine recruitment. *Fish and Fisheries*, 24(3): 466–487. <https://doi.org/10.1111/faf.12740>
34. Wan R., Song P., Li Z., Long X., Wang D., Zhai L. **2023**. Larval fish spatiotemporal dynamics of different ecological guilds in Yangtze Estuary. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1): 143. <https://doi.org/10.3390/jmse11010143>
35. Chen C.S., Chiu T.S. **2003**. Early life history traits of Japanese anchovy in the northeastern waters of Taiwan, with reference to larval transport. *Zoological Studies*, 42(2): 248–257.
36. Liu C., Xian W., Liu S., Chen Y. **2018**. Variations in early life history traits of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the Yangtze River Estuary. *PeerJ*, 6: e4789. <https://doi.org/10.7717/peerj.4789>
37. Мухаметова О.Н. **2024**. Видовой состав, сезонная динамика и распределение икры и личинок рыб вблизи устья р. Мануй у восточного побережья о. Сахалин. *Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях: Труды СахНИРО*, 20: 58–92.
38. Мухаметова О.Н. **2012**. Исследования ихтиопланктона в лаборатории гидробиологии. *Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях: Труды СахНИРО*, 13: 118–133.
39. Осадчиев А.А. **2017**. Распространение плюма реки Амур в Амурском лимане, Сахалинском заливе. *Океанология*, 57(3): 417–424. <https://doi.org/10.7868/S0030157417020150>
40. Мороз В. В., Шатилина Т. Александровна, Рудых Н.И. **2021**. Формирование аномальных термических режимов в северной части Татарского пролива и Амурском лимане под воздействием атмосферных процессов. *Вестник ДВО РАН*, 6: 101–110. https://doi.org/10.37102/0869-7698_2021_220_06_10
41. Жабин И.А., Абросимова А.А., Дубина В.А., Некрасов Д.А. **2010**. Влияние стока р. Амур на гидрологические условия Амурского лимана и Сахалинского залива Охотского моря в период весенне-летнего паводка. *Метеорология и гидрология*, 4: 93–100.
42. Ракитин Т.Д. **2024**. Ландшафтно-биономическое районирование и пространственно-временная многолетняя динамика концентрации хлорофилла-а фитопланктона в береговой зоне северо-западной части Японского моря. *Биосфера*, 2: 206–222.
43. Цхай Ж.Р., Хен Г.В. **2020**. Оценка общего содержания хлорофилла-а в Охотском море с использованием спутниковых данных. *Исследование Земли из космоса*, 6: 34–46. <https://doi.org/10.31857/S0205961420060056>
44. Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В. **2023**. Влияние стока реки Амур на пространственные распределения температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла а в Амурском лимане и прилегающих акваториях. *Результаты Второй Амурской экспедиции. Т. 2: Труды СахНИРО*, 19(2): 117–133.
45. Жабин И.А., Дубина В.А. **2008**. Влияние стока реки Амур на гидрологические условия Амурского лимана. *Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях: Труды СахНИРО*, 10: 190–200.
46. Рогачев К.А., Шлык Н.В. **2011**. Анциклоническая циркуляция вод Амура в Сахалинском заливе по спутниковым и морским наблюдениям. *Исследование Земли из космоса*, 6: 73–79.
47. Андреев А.Г. **2019**. Распределение распресненных вод Амурского лимана в Охотском море по данным спутниковых наблюдений. *Исследование Земли из космоса*, 2: 89–96. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019289-96>
48. Лабай В.С., Даирова Д.С., Курилова Н.В., Шпилько Т.С. **2013**. Макробентос залива Байкал (остров Сахалин). *Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях: Труды СахНИРО*, 14: 211–236.
49. Wan R., Bian X. **2012**. Size variability and natural mortality dynamics of anchovy *Engraulis japonicus* eggs under high fishing pressure. *Marine Ecology*

- Progress Series*, 465: 243–251. <https://doi.org/10.3354/meps09795>
50. Соколовская Т.Г., Беляев В.А. **1987**. *Рекомендации по сбору и обработке ихтиопланктона зоны течения Куросио*. Владивосток: ТИНРО, 70 с.
 51. Баврина А.П. **2021**. Современные правила применения параметрических и непараметрических критериев в статистическом анализе медико-биологических данных. *Медицинский альманах*, 1(66): 64–73.
 52. Хлебович В.В. **1974**. *Критическая соленость биологических процессов*. Л.: Наука, 236 с.
 53. Хлебович В.В. **1989**. Критическая соленость и хорогалиникум: современный анализ понятий. *Труды ЗИН АН СССР*, 196: 5–11.
 54. Шелехов В.А., Епур И.В., Баланов А.А. **2020**. Видовой состав и структура ихтиопланктона северной части Японского моря в летний период 2017 г. *Вопросы ихтиологии*, 60(1): 40–51. <https://doi.org/10.31857/S0042875220010178>
 55. Шевченко Г.В., Ложкин Д.М. **2022**. Сезонные вариации температуры поверхности Охотского моря и прилегающих районов по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5. *Океанологические исследования*, 50(1): 25–37. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(1\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(1).3)
 56. Якунин Л.П., Дударев О.В., Боцул А.И., Аникиев В.В., Уткин И.В. **2000**. О влиянии гидрометеорологических факторов на распределение взвешенного стока реки Амур в охотоморской части эстуария. *Гидрометеорологические и экологические условия дальневосточных морей: оценка воздействия на морскую среду: Тематич. вып. ДВНИГМИ*. Владивосток, 3: 139–149.
 57. Могильникова Т.А., Латковская Е.М., Коренева Т.Г. **2011**. Гидрохимические условия развития летнего фитопланктона зал. Байкал (северо-западный Сахалин). *Чтения памяти профессора Владимира Яковлевича Леванидова*, 5: 360–369.
 58. Xing Q., Yu H., Yu H., Sun P., Liu Y., Ye Z., Li J., Tian Y. **2020**. A comprehensive model-based index for identification of larval retention areas: A case study for Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the Yellow Sea. *Ecological Indicators*, 116: 106479. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106479>
 59. Checkley D.M.Jr., Asch R.G., Rykaczewski R.R. **2017**. Climate, anchovy, and sardine. *Annual Review of Marine Science*, 9: 469–493. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-122414-033819>
 60. Сергеева Н.П., Тепнин О.Б., Веселов С.А., Смирнов А.В. **2019**. Интенсивность нереста и структура нерестового запаса западноберинговоморского минтая в 2018 г. *Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана*, 1(53): 34–40. <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2019.53.34-40>
 61. Лабай В.С., Шевченко Г.В., Галанин Д.А., Частиков В.Н., Шпилько Т.С., Троицкая Н.В. **2022**. Макрозообентос Сахалинского залива Охотского моря в зоне влияния вод реки Амур. *Вопросы рыболовства*, 23(4): 67–88. <https://doi.org/10.36038/0234-2774-2022-23-4-67-88>
 62. Мухаметова О.Н., Лабай В.С., Живоглядов А.А., Пометеев Е.В., Смирнов И.П., Атаманова И.А., Мотылькова И.В., Коновалова Н.В., Никитин В.Д., Корнеев Е.С., Воронков В.Б. **2022**. Биота северо-восточной части Сахалинского залива и сопредельных вод Охотского моря. *Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях: Труды СахНИРО*, 18: 179–214.
 63. Аннин В.К. **2008**. Экология бентосных фораминифер на литорали б. Котиковая (зал. Терпения, о. Сахалин). *Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях: Труды СахНИРО*, 10: 183–189.
 64. Takahashi M., Watanabe Y., Kinoshita T., Watanabe C. **2001**. Growth of larval and early juvenile Japanese anchovy, *Engraulis japonicus*, in the Kuroshio-Oyashio transition region. *Fisheries Oceanography*, 10(2): 235–247. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2001.00160.x>
 65. Takasuka A., Aoki I., Mitani I. **2004**. Three synergistic growth-related mechanisms in the short-term survival of larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in Sagami Bay. *Marine Ecology Progress Series*, 270: 217–228. <http://dx.doi.org/doi:10.3354/meps270217>
 66. Itoh T., Tominaga S., Kimura R., Karakame M., Ooshita I., Kan-oh Y., Sakiyama T. **2019**. Experimental captive breeding and exhibition of post-larvae «Shirasu» of the Japanese anchovy *Engraulis japonicus*. In: *Proceedings of 10th International aquarium congress. Fukushima, November 7–10, 2018*, 52–55.
 67. Yu H., Yu H., Ito Sh., Tian Y., Wang H., Liu Y., Xing Q., Bakun A., Kelly R.M. **2020**. Potential environmental drivers of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) recruitment in the Yellow Sea. *Journal of Marine Systems*, 212: 103431. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103431>
 68. Ohata R., Masuda R., Yamashita Y. **2011**. Ontogeny of antipredator performance in hatchery-reared Japanese anchovy *Engraulis japonicus* larvae exposed to visual or tactile predators in relation to turbidity. *Journal of Fish Biology*, 79(7): 2007–2018. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2011.03141.x>
 69. Iseki K., Kiyomoto Y. **1997**. Distribution and settling of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) eggs at the spawning ground off Changjiang River in the East China Sea. *Fisheries Oceanography*, 6(3): 205–210. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.1997.00040.x>

References

- Liu S., Liu Y., Alabina I.D., Tian Y., Ye Z., Yu H., Li J., Cheng J. **2020**. Impact of climate change on wintering ground of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) using marine geospatial statistics. *Frontiers in Marine Science*, 7: 604. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00604>
- Zhang W., Yu H., Ye Z., Tian Y., Liu Y., Li J., Xing Q., Jiang Y. **2021**. Spawning strategy of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the coastal Yellow Sea: Choice and dynamics. *Fisheries Oceanography*, 30(4): 366–381. <https://doi.org/10.1111/fog.12523>
- Chen X., Liu Q., Yin F. **2023**. Evaluation of Yellow Sea anchovy (*Engraulis japonicus*) fishery for management strategies using a data-limited management toolkit. *Heliyon*, 9(7), e18058, 11 p. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18058>
- Fellatami K., Zhang W., Zhang C., Liu S., Tian Y. **2024**. Age and growth of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*, Temminck & Schlegel, 1846) in coastal waters around Shandong Peninsula, China. *Fishes*, 9(4), 124. <https://doi.org/10.3390/fishes9040124>
- Baitaliuk A.A., Radchenko V.I. **2024**. The current status and trends in the commercial stock of the Japanese anchovy, *Engraulis japonicus* (Engraulidae), in Russian waters of the Sea of Japan. *Russian Journal of Marine Biology*, 50(7): 380–391. <https://doi.org/10.1134/S1063074024700299>
- Kolpakov N.V., Nikitin V.D. **2023**. Composition and quantitative characteristics of fish communities in the coastal zone of the outer estuary of the Amur River. I. Nevelsky Strait. *Results of the Second Amur expedition. Vol. 2: Transactions of the SakhNIRO*, 19(2): 3–22. (In Russ.).
- Kolpakov N.V., Nikitin V.D. **2023**. Composition and quantitative characteristics of fish communities in the coastal zone of the outer estuary of the Amur River. II. Amur Liman. *Results of the Second Amur expedition. Vol. 2: Transactions of the SakhNIRO*, 19(2): 23–35. (In Russ.).
- Kolpakov N.V., Nikitin V.D., Zhivoglyadov A.A., Prokhorov A.P. **2023**. Composition and quantitative characteristics of fish communities in the coastal zone of the outer estuary of the Amur River. III. Sakhalin Bay. *Results of the Second Amur expedition. Vol. 2: Transactions of the SakhNIRO*, 19(2): 36–51. (In Russ.).
- Velikanov A.Ya. **2004**. On the status of pelagic fish communities off the west and east Sakhalin Island in 2002. *Izvestiya TINRO*, 137: 207–225. (In Russ.).
- Velikanov A.Ya., Mukhametov I.N., Shevchenko G.V., Zavarzina N.K. **2025**. Biological characteristics of the Japanese anchovy *Engraulis japonicus* (Engraulidae) during seasonal migrations off the Sakhalin Island in 2000–2023. *Voprosy rybolovstva = Problems of Fisheries*, 26(1): 59–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.36038/0234-2774-2025-26-1-59-76>
- Zhang H., Xian W., Liu S. **2015**. Ichthyoplankton assemblage structure of springs in the Yangtze Estuary revealed by biological and environmental visions. *PeerJ*, 3: e1186. <https://doi.org/10.7717/peerj.1186>
- Kim J.Y., Lee J.B., Suh Y.-S. **2020**. Oceanographic indicators for the occurrence of anchovy eggs inferred from generalized additive models. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 23, 19. <https://doi.org/10.1186/s41240-020-00161-y>
- Fujita T., Yamamoto M., Kono N., Tomiyama T., Sugimatsu K., Yoneda M. **2021**. Temporal variations in hatch date and early survival of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in response to environmental factors in the central Seto Inland Sea, Japan. *Fisheries Oceanography*, 30(5): 527–541. <https://doi.org/10.1111/fog.12535>
- Kawaguchi K., Yamashita Y., Hayashi A. **1990**. Some aspects of spawning of the reared Japanese anchovy (*Engraulis japonicus* H.) in relation to the photoperiod water temperature and starvation. *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography*, 54(4): 364–372.
- Funamoto T., Aoki I., Wada Y. **2004**. Reproductive characteristics of Japanese anchovy, *Engraulis japonicus*, in two bays of Japan. *Fisheries Research*, 70(1): 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2004.06.017>
- Takasuka A., Oozeki Y., Aoki I. **2007**. Optimal growth temperature hypothesis: Why do anchovy flourish and sardine collapse or vice versa under the same ocean regime? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 64(5): 768–776. <https://doi.org/10.1139/f07-052>
- Funamoto T., Aoki I. **2002**. Reproductive ecology of Japanese anchovy off the Pacific coast of eastern Honshu, Japan. *Journal of Fish Biology*, 60: 154–169. [doi:10.1006/jfbi.2001.1829](https://doi.org/10.1006/jfbi.2001.1829)
- Takasuka A., Oozeki Y., Kubota H. **2008**. Multi-species regime shifts reflected in spawning temperature optima of small pelagic fish in the western North Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, 360: 211–217. <https://doi.org/10.3354/meps07407>
- Zhu Q., Wu R., Masuda Y., Takahashi Y., Okabe K., Koizum K., Iida A., Katayama S. **2023**. Spawning phenology and early growth of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) off the Pacific coast of Japan. *Fishes*, 8, 11. <https://doi.org/10.3390/fishes8010011>
- Hayashi A., Goto T., Takahashi M., Watanabe Y. **2019**. How Japanese anchovy spawn in northern waters: start with surface warming and end with day length shortening. *Ichthyological Research*, 66: 79–87. <https://doi.org/10.1007/s10228-018-0652-5>
- Davidova S.V. **1994**. Vstrechaemost' ikry dal'nevostochnoy sardiny i yaponskogo anchousa v zalive Petra Velikogo (Yaponskoe more) (The occurrence of the eggs of Japanese sardine and Japanese anchovy in Peter the Great Bay (the Sea of Japan)). *Izvestiya TINRO*, 115: 130–136. (In Russ.).

22. Davidova S.V., Shevchenko A.V. **2002**. Spawning of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* (Engraulidae) in Peter the Great Bay (the Sea of Japan) in 1996–1998. *Journal of Ichthyology*, 42(2): 170–179.
23. Mukhametova O.N. **2004**. Some characteristics of spatial distribution and development of eggs and larvae in the Japanese anchovy *Engraulis japonicus* (Engraulidae) in waters off Sakhalin. *Journal of Ichthyology*, 44(2): 158–166.
24. Moukhametova O.N., Moukhametov I.N. **2013**. Ichthyoplankton of nearshore area of Aniva Bay. *Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas: Trudy SakhNIRO = Transactions of the SakhNIRO*, 14: 180–197. (In Russ.).
25. Moukhametova O.N. **2012**. Ichthyoplankton as an indicator of fish reproduction in Tatarskiy Strait (Japan Sea). In: *Proceedings of the 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu, Hokkaido, Japan, 19–24 February 2012)*, 133–136.
26. Moukhametova O.N. **2014**. Reproductive and nursery potential of nearshore area in the East of Tatarskiy Strait. In: *Proceedings of the 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu, Hokkaido, Japan, 16–19 February 2014)*, 288–291.
27. Moukhametova O.N. **2013**. Seasonal Formation of Ichthyoplankton Complexes in Aniva Bay (Southern Sakhalin). In: *Proceedings of the 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu, Hokkaido, Japan, 17–24 February 2013)*, 62–65.
28. Sekiguchi H., Sugishima H. **1995**. Fine-scale spatial distribution of anchovy eggs in Ise Bay, Central Japan. *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography*, 59(1): 19–31.
29. Yang Y.Y., Zhu M.M., Song Q.Q., Wang X.X., Li F., Zhang X.M., Pang Z.W., Su B. **2024**. The water-sediment regulation scheme on the community structure of ichthyoplankton in the Yellow River estuary. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 48(3): 488–503. <https://doi.org/10.7541/2024.2023.0241>
30. Islam M.Sh., Tanaka M. **2009**. Diet and prey selection in larval and juvenile Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in Ariake Bay, Japan. *Aquatic Ecology*, 43(2): 549–558. <https://doi.org/10.1007/s10452-008-9207-6>
31. Zhang H., Xian W., Liu S. **2016**. Autumn ichthyoplankton assemblage in the Yangtze Estuary shaped by environmental factors. *PeerJ*, 4: e1922. <https://doi.org/10.7717/peerj.1922>
32. Miró J.M., Megina C., Donázar-Aramendía I., Reyes-Martínez M.J., Sánchez-Moyano J.E., García-Gómez J.C. **2020**. Environmental factors affecting the nursery function for fish in the main estuaries of the Gulf of Cadiz (south-west Iberian Peninsula). *Science of the Total Environment*, 737: 139614. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139614>
33. Arevalo E., Cabral H.N., Villeneuve B., Possémé C., Lepage M. **2023**. Fish larvae dynamics in temperate estuaries: A review on processes, patterns and factors that determine recruitment. *Fish and Fisheries*, 24(3): 466–487. <https://doi.org/10.1111/faf.12740>
34. Wan R., Song P., Li Z., Long X., Wang D., Zhai L. **2023**. Larval fish spatiotemporal dynamics of different ecological guilds in Yangtze Estuary. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1): 143. <https://doi.org/10.3390/jmse11010143>
35. Chen C.S., Chiu T.S. **2003**. Early life history traits of Japanese anchovy in the northeastern waters of Taiwan, with reference to larval transport. *Zoological Studies*, 42(2): 248–257.
36. Liu C., Xian W., Liu S., Chen Y. **2018**. Variations in early life history traits of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the Yangtze River Estuary. *PeerJ*, 6: e4789. <https://doi.org/10.7717/peerj.4789>
37. Mukhametova O.N. **2024**. Species composition, seasonal dynamics and spatial distribution of fish eggs and larvae near the mouth of the Manuy River off the Eastern coast of Sakhalin Island. *Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas: Trudy SakhNIRO = Transactions of the SakhNIRO*, 20: 58–92. (In Russ.).
38. Moukhametova O.N. **2012**. Ichthyoplankton studies in the Laboratory of Hydrobiology. *Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas: Trudy SakhNIRO = Transactions of the SakhNIRO*, 13: 118–133. (In Russ.).
39. Osadchiev A.A. **2017**. Spreading of the Amur River plume in the Amur Liman, Sakhalin Gulf, and the Strait of Tartary. *Oceanology*, 57(3): 376–382. <https://doi.org/10.1134/S0001437017020151>
40. Moroz V.V., Shatilina T. A., N.I. Rudykh. **2021**. The abnormally thermal regime forming in the North part of the Tatar Strait and Amur Liman under the influence of atmosphere processes. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 6: 101–110. https://doi.org/10.37102/0869-7698_2021_220_06_10
41. Zhabin I.A., Abrosimova A.A., Dubina V.A., Nekrasov D.A. **2010**. Influence of the Amur River runoff on the hydrological conditions of the Amur Liman and Sakhalin Bay (Sea of Okhotsk) during the spring-summer flood. *Russian Meteorology and Hydrology*, 35(4): 295–300. <https://doi.org/10.3103/S1068373910040084>
42. Rakitin T.D. **2024**. Landscape-bionomic zoning and spatial-temporal multiyear dynamics of phytoplankton chlorophyll-a concentration in the coastal zone of the northwestern part of the Sea of Japan. *Biosfera*, 2: 206–222. (In Russ.).
43. Tskhay Zh.R., Khen G.V. **2021**. Estimating the Total Concentration of Chlorophyll *a* in the Sea of Okhotsk

- Using Satellite Data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 57(9): 980–990. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090656>
44. Tskhay Zh.R., Shevchenko G.V. **2023**. Influence of the Amur River runoff on the spatial distributions of sea surface temperature and chlorophyll a concentrations in the Amur Liman and adjacent areas. *Results of the Second Amur expedition. Vol. 2: Transactions of the SakhNIRO*, 19(2): 117–133. (In Russ.).
 45. Zhabin I.A., Dubina V.A. **2008**. Influence of Amur River runoff on hydrological conditions of the Amur estuary. *Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas: Trudy SakhNIRO = Transactions of the SakhNIRO*, 10: 190–200. (In Russ.).
 46. Rogachev K.A., Shlyk N.V. **2011**. Anticyclonic circulation in the Sakhalin Bay, Sea of Okhotsk determined from satellite data. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 6: 73–79. (In Russ.).
 47. Andreev A.G. **2019**. Distribution of desalinated waters of the Amur Estuary in the Okhotsk Sea according to satellite observations. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 55(9): 1160–1165. <https://doi.org/10.1134/S0001433819090068>
 48. Labay V.S., Dairova D.S., Kurilova N.V., Shpil'ko T.S. **2013**. Macrobenthos of Baikal Bay (Sakhalin Island). *Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas: Trudy SakhNIRO = Transactions of the SakhNIRO*, 14: 211–236. (In Russ.).
 49. Wan R., Bian X. **2012**. Size variability and natural mortality dynamics of anchovy *Engraulis japonicus* eggs under high fishing pressure. *Marine Ecology Progress Series*, 465: 243–251. <https://doi.org/10.3354/meps09795>
 50. Sokolovskaya T.G., Belyaev V.A. **1987**. *Rekomendatsii po sboru i obrabotke ikhtoplanktona zony techeniya Kuroshio*. Vladivostok: TINRO, 70 p. (In Russ.).
 51. Bavrina A.P. **2021**. Modern rules for the use of parametric and nonparametric tools in the statistical analysis of biomedical data. *Medical Almanac*, 1(66): 64–73. (In Russ.).
 52. Khlebovich V.V. **1974**. *Kriticheskaya solenost' biologicheskikh protsessov = The critical salinity of biological processes*. Leningrad: Nauka, 236 p. (In Russ.).
 53. Khlebovich V.V. **1989**. Kriticheskaya solenost' i khorogalinikum: sovremennyy analiz ponyatiy. *Trudy ZIN AN SSSR*, 196: 5–11. (In Russ.).
 54. Shelekhov V.A., Epur I.V., Balanov A.A. **2020**. Species composition and structure of ichthyoplankton of the northern part of the Sea of Japan in summer of 2017. *Journal of Ichthyology*, 60(1): 36–47. <https://doi.org/10.1134/S0032945220010154>
 55. Shevchenko G.V., Lozhkin D.M. **2022**. Seasonal variations in the surface temperature of the Sea of Okhotsk and surrounding regions from satellite data. *Journal of Oceanological Research*, 50(1): 25–37. (In Russ.). [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(1\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(1).3)
 56. Yakunin L.P., Dudarev O.V., Botsul A.I., Anikiev V.V., Utkin I.V. **2000**. Effect of hydrometeorological factors on suspended matter distribution in Okhotsk Sea part of the Amur River estuary. *Hydrometeorological and ecological conditions of the Far Eastern seas: marine environmental impact assessment. FERHRI Special Issue*. Vladivostok, 3: 139–149. (In Russ.).
 57. Mogilnikova T.A., Latkovskaya E.M., Koreneva T.G. **2011**. Hydrochemical conditions for summer phytoplankton development in Baikal Bay (northwestern Sakhalin). *Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings*, 5: 360–369. (In Russ.).
 58. Xing Q., Yu H., Yu H., Sun P., Liu Y., Ye Z., Li J., Tian Y. **2020**. A comprehensive model-based index for identification of larval retention areas: A case study for Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the Yellow Sea. *Ecological Indicators*, 116: 106479. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106479>
 59. Checkley D.M.Jr., Asch R.G., Rykaczewski R.R. **2017**. Climate, anchovy, and sardine. *Annual Review of Marine Science*, 9: 469–493. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-122414-033819>
 60. Sergeeva N.P., Tepnin O.B., Veselov S.A., Smirnov A.V. **2019**. Spawning intensity and structure of parental stock of the Western Bering Sea Walley pollock in 2018. *The researches of the aquatic biological resources of Kamchatka and the North-West Part of the Pacific Ocean*, 1(53): 34–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2019.53.34-40>
 61. Labay V.S., Shevchenko G.V., Galanin D.A., Chastikov V.N., Shpilko T.S., Troitzkaya N.V. **2022**. Macrobenthos of the Sakhalin Bay of the Sea of Okhotsk in the zone of influence of Amur River waters.: Results of the Second Amur expedition. Vol. 1. *Voprosy rybolovstva = Problems of Fisheries*, 23(4): 67–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.36038/0234-2774-2022-23-4-67-88>
 62. Mukhametova O.N., Labay V.S., Zhivoglyadov A.A., Pometeev E.V., Smirnov I.P., Atamanova I.A., Motyl'kova I.V., Konovalova N.V., Nikitin V.D., Korneev E.S., Voronkov V.B. **2022**. Biota of the northeastern part of Sakhalinskyi Bay and adjacent waters of the Okhotsk Sea. *Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas: Trudy SakhNIRO = Transactions of the SakhNIRO*, 18: 179–214. (In Russ.).
 63. Annin V.K. **2008**. Ecology of benthic foraminifera in the littoral zone of Kotikovaya Bight (Terpeniya Bay, Sakhalin Island). *Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region*

and adjoining water areas: *Trudy SakhNIRO = Transactions of the SakhNIRO*, 10: 183–189. (In Russ.).

64. Takahashi M., Watanabe Y., Kinoshita T., Watanabe C. **2001**. Growth of larval and early juvenile Japanese anchovy, *Engraulis japonicus*, in the Kuroshio-Oyashio transition region. *Fisheries Oceanography*, 10(2): 235–247. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2001.00160.x>
65. Takasuka A., Aoki I., Mitani I. **2004**. Three synergistic growth-related mechanisms in the short-term survival of larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in Sagami Bay. *Marine Ecology Progress Series*, 270: 217–228. <http://dx.doi.org/doi:10.3354/meps270217>
66. Itoh T., Tominaga S., Kimura R., Karakame M., Ooshita I., Kan-oh Y., Sakiyama T. **2019**. Experimental captive breeding and exhibition of post-larvae «Shirasu» of the Japanese anchovy *Engraulis japonicus*. In: *Proceedings of 10th International aquarium congress. Fukushima, November 7–10, 2018*, 52–55.
67. Yu H., Yu H., Ito Sh., Tian Y., Wang H., Liu Y., Xing Q., Bakun A., Kelly R.M. **2020**. Potential environmental drivers of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) recruitment in the Yellow Sea. *Journal of Marine Systems*, 212: 103431. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103431>
68. Ohata R., Masuda R., Yamashita Y. **2011**. Ontogeny of antipredator performance in hatchery-reared Japanese anchovy *Engraulis japonicus* larvae exposed to visual or tactile predators in relation to turbidity. *Journal of Fish Biology*, 79(7): 2007–2018. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2011.03141.x>
69. Iseki K., Kiyomoto Y. **1997**. Distribution and settling of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) eggs at the spawning ground off Changjiang River in the East China Sea. *Fisheries Oceanography*, 6(3): 205–210. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.1997.00040.x>

Об авторах

Мухаметова Ольга Николаевна (<https://orcid.org/0000-0001-8672-9086>), кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гидробиологии Сахалинского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск, Россия, olga.sakhniro@gmail.com

Мухаметов Ильяс Ниязович (<https://orcid.org/0009-0003-6147-2052>), кандидат биологических наук, зав. сектором морских рыб лаборатории морских и пресноводных рыб Сахалинского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск, Россия, moukh00@mail.ru

About the Authors

Moukhametova, Olga N. (<https://orcid.org/0000-0001-8672-9086>), Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher at the Laboratory of hydrobiology of Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation, olga.sakhniro@gmail.com

Moukhametov, Ilias N. (<https://orcid.org/0009-0003-6147-2052>), Cand. Sci. (Biology), Head of the Marine fish sector of the Marine and freshwater fish laboratory of Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation, moukh00@mail.ru

Поступила 26.05.2025

Принята к публикации 17.08.2025

Received 26 May 2025

Accepted 17 August 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 550.849

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.3.325-331>
<https://www.elibrary.ru/stwzom>

SHORT REPORT

Methodical experiment on the use of zeolitized tuffs to detect low concentrations of hydrocarbons in an environment simulating bottom sediments*

Rustam F. Bulgakov[@], Leonid M. Bogomolov

^{@E-mail:} r.bulgakov@imgg.ru

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

Abstract. This paper presents the results of a methodical (trial) experiment for conducting in-kind conditions on capturing microseepage hydrocarbon molecules by sorption, which amount is sufficient for the certificate of the presence of oil and gas-bearing formations. The experiment simulating hydrocarbon accumulation in traps with sorbents was organized and conducted at the Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences as a step before the installation of traps in natural conditions near a hydrocarbon deposit. Zeolitized tuffs from the Ogonkovsky site of the Lyutogskoye deposit (Sakhalin Island) with a 50 % zeolite content, as well as the peats were used as sorbents. The sorbents were kept for 5 months in an artificial container containing soil (lofts), seawater, and a small additive of a hydrocarbon mixture. The obtained results confirmed the possibility of detecting low concentrations of hydrocarbons in an environment similar to bottom sediments using traps with a zeolite sorbent. The advantage of this sorbent as an indicator of hydrocarbon microseepage over a deposit compared to a peat sorbent was revealed.

Keywords: microseepage, geochemical methods, sorption, geochemical anomalies, zeolites

Методический эксперимент по применению цеолитизированных туфов для обнаружения низких концентраций углеводородов в среде, моделирующей придонные осадки

Р. Ф. Булгаков[@], Л. М. Богомолов

^{@E-mail:} r.bulgakov@imgg.ru

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

Резюме. В работе приводятся результаты методического эксперимента по улавливанию методом сорбции микропросачивающихся молекул углеводородов в количестве, достаточном для свидетельства о наличии нефтегазоносных пластов. Эксперимент с имитацией накопления углеводородов в ловушках с сорбентами проведен в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН как подготовительный, перед установкой ловушек в натурных условиях. В качестве сорбентов использовались цеолитизированные туфы с Огоньковского участка Лютогского месторождения (о. Сахалин) с содержанием цеолита 50 % и торфяной сорбент. Сорбенты выдерживали в течение 5 мес. в искусственной емкости, содержащей грунт (суглинок), морскую воду и малую добавку

* The translation from Russian: Булгаков Р.Ф., Богомолов Л.М. Методический эксперимент по применению цеолитизированных туфов для обнаружения низких концентраций углеводородов в среде, моделирующей придонные осадки. [Электронный ресурс]. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 3. URL: <http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-3-8.pdf>. Translated by Valeria Maksimova.

углеводородной смеси. Полученные результаты подтвердили возможность обнаружения низких концентраций углеводородов в среде, схожей с придонными осадками, с помощью ловушек с цеолитом-сорбентом. Выявлено преимущество этого сорбента как индикатора микропросачивания углеводородов над залежью по сравнению с торфяным сорбентом.

Ключевые слова: микропросачивание, геохимические методы, сорбция, геохимические аномалии, цеолиты

For citation: Bulgakov R.F., Bogomolov L.M. Methodical experiment on the use of zeolitized tuffs to detect low concentrations of hydrocarbons in an environment simulating bottom sediments. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 3, pp. 325–331. <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.3.325-331>; <https://www.elibrary.ru/stwzom>. [The translation from Russian: Булгаков Р.Ф., Богомолов Л.М. Методический эксперимент по применению цеолитизированных туфов для обнаружения низких концентраций углеводородов в среде, моделирующей придонные осадки. [Электронный ресурс]. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 3. URL: <http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-3-8.pdf>]

Funding and Acknowledgements

The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (out within the framework of the state task of IMGG FEB RAS).

The authors express their gratitude to I.M. Shakhov for engineering and technical support of the experiment and to P.A. Kamenev for providing zeolite samples from the Lyutogskoye deposit.

The mechanism of hydrocarbon microseepage and the application of this phenomenon for prospecting

Exploration of new deposits in water areas, especially in the Arctic, is a serious technological challenge. Drilling operations on the shelf, further complicated by severe ice conditions, are almost an order of magnitude more expensive than similar exploration operations on land. This necessitates the introduction of innovative import-substituting exploration technologies that help reduce the number of exploration wells while increasing the success of exploration.

A promising phenomenon, successfully applied in global exploration practice, is the empirically established process of the vertical microseepage of molecular substances (Fig. 1), first recognized in the 1930s [1, 2].

Hydrocarbon microseepage outlines the oil-gas field, due to upward seepage of these molecules through the sealing cap of an oil and gas reservoir. The hydrocarbon flux induces epigenetic transformations throughout the overlying stratigraphic section, generating both geochemical and geophysical anomalies, and at the surface it produces geochemical anomalies characterized

Финансирование и благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН).

Авторы благодарят И.М. Шахова за инженерно-техническое сопровождение эксперимента и П.А. Каменева за предоставленные образцы цеолита Лютогского месторождения.

by components specific to the reservoir – the so-called geochemical “signature”.

Evaluations of the effectiveness of geochemical methods in exploration [1, 2] have demonstrated that among wells drilled in prospective areas associated with positive microseepage anomalies, 82 % resulted in commercial discoveries, whereas among wells drilled in prospective areas lacking

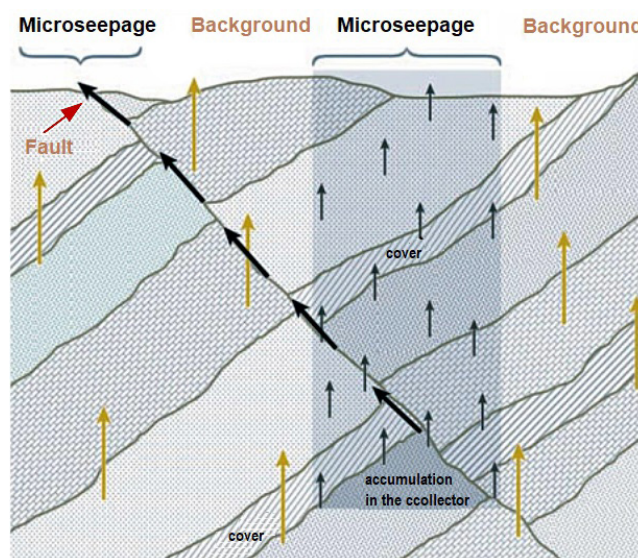


Fig. 1. The ratio of macroseepage and microseepage processes (according: <https://agisurveys.net/>).

Рис. 1. Соотношение процессов макро- и микропросачивания (по материалам: <https://agisurveys.net/>).

clear microseepage anomalies, only 11 % were successful. These results indicate that properly acquired, interpreted, and integrated microseepage data can reliably predict the presence of hydrocarbons prior to drilling.

It should be emphasized that the mechanism of microseepage fundamentally differs from macroseepage phenomena, i.e., direct hydrocarbon leakage to the surface along weakened fault zones (Fig. 1).

The theoretical framework for explaining the mechanism of hydrocarbon microseepage has been discussed in the context of the following hypotheses:

- 1) molecular diffusion,
- 2) transport in dissolved form together with rising water droplets,
- 3) buoyant uplift driven by microbubbles.

Researchers have concluded that the relatively rapid (75–300 m/year), strictly vertical migration of hydrocarbons in the absence of fault-related conduits – producing concentration anomalies directly above the subsurface projection of the reservoir – occurs primarily due to the buoyant force of hydrocarbon microbubbles [1, 2].

The prerequisite for the operation of the microbubble buoyancy mechanism is that the capillary pressure of hydrocarbon microbubbles must exceed sufficiently the pressure of water within the larger interconnected pores of the sealing formation, to provide the water displacement process.

In the mathematical model, the pressure of the gas phase exceeds that of the water by the value of capillary pressure (P_c). In this context, the difference in the gradients of the hydraulic pressure of gas (ϕ_g) and water (ϕ_w) plays a key role in exceeding the pressure of the gas phase over that of the water phase:

$$P_c = P_g - P_w = (\phi_g - \phi_w) + (\rho_w - \rho_g)gh,$$

where P_g and P_w denote the pressure of gas and water, respectively; g is the gravitational acceleration; ρ_w and ρ_g are the densities of water and gas; and h represents the height of the water and gas columns.

Due to its inherent properties of microseepage: the upward migration of hydrocarbon molecules (C_1 – C_{20}) together with microdroplets of water and gases, vertically rising above the reservoir

through the sealing trap up to the surface, this phenomenon is manifested itself in the geochemical anomalies as well as in geophysical fields (Fig. 2).

It should be emphasized that the intensity of hydrocarbon and water fluxes is controlled by the difference between the hydraulic pressure gradients of water and hydrocarbon gas, proportionally to the permeability of the rock to each phase.

In continuation of works [1, 2], experimental modeling of microseepage processes has been undertaken to refine the understanding of their mechanisms.

Results of laboratory tests on the distribution of gaseous geochemical concentrations in a simulated section comprising the reservoir seal and overlying strata [3] demonstrated that the use of

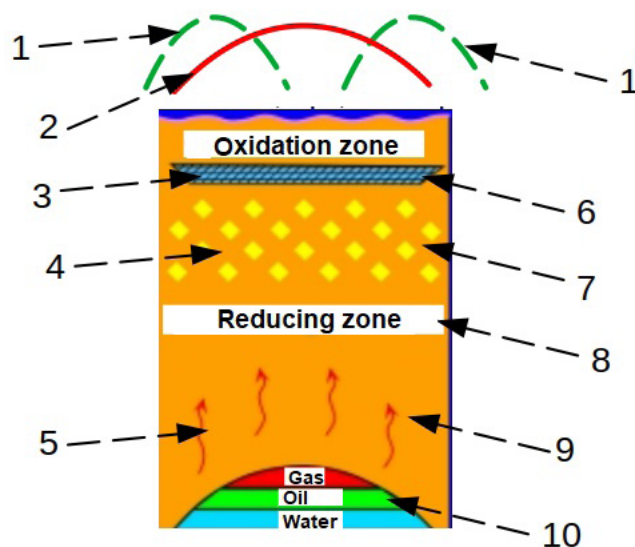


Fig. 2. A model of the microseepage phenomenon and the geochemical and geophysical anomalies caused by it. 1, anomalies on the periphery of the deposit; 2, apical anomaly. Geochemical anomalies: 3, saturation with carbonates; 4, saturation with pyrite, sulfur, pyrrhotite, greigite, uranium; 5, hydrocarbons seep upward and create a reduction zone. Geophysical anomalies: 6, high electrical resistance; 7, high values of induced polarization; 8, magnetic anomaly; 9, low values of electrical resistance; 10, anomalies of seismic velocities. (According to: https://www.searchanddiscovery.com/documents/2020/42542abrams/ndx_abrams.pdf).

Рис. 2. Модель феномена микропросачивания и обусловленные им геохимические и геофизические аномалии. 1 – аномалии по периферии залежи, 2 – апикальная аномалия. Геохимические аномалии: 3 – насыщения карбонатами, 4 – насыщение пиритом, серой, пирротинном, грейгитом, ураном, 5 – углеводороды просачиваются вверх и создают восстановительную зону. Геофизические аномалии: 6 – высокое электрическое сопротивление, 7 – высокие значения вызванной поляризации, 8 – магнитная аномалия, 9 – низкие значения электрического сопротивления, 10 – аномалии сейсмических скоростей. (По материалам: https://www.searchanddiscovery.com/documents/2020/42542abrams/ndx_abrams.pdf).

free-gas indicators, such as the C_1 / C_2 ratio, most accurately reflects the characteristics of microseepage in the most accurate manner. It was found that hydrocarbons sorbed by the rock matrix do not significantly change their concentrations over short time intervals under the influence of microseepage. In contrast, gases released upon heating actively participate in the microseepage flux, while the free gas playing a dominant role.

In another study [4], the same group of authors established that the ratio of iso-butane to n-butane ($i-C_4 / n-C_4$) is a reliable indicator for detecting microseepage through diffusion and bubble buoyancy in an aqueous medium, with diffusion becoming effective above the groundwater horizon.

Experimental modeling of microseepage through multilayered media [5] revealed that below the groundwater level the prevailing mechanism is buoyant migration of gas microbubbles, whereas diffusion is secondary. However, diffusion becomes the dominant process above the groundwater table. Microfracturing was identified as the primary channel for hydrocarbon microseepage.

A serious challenge in applying microseepage phenomena to exploration is the determination of the equilibrium microseepage flux, which governs the intensity of surface geochemical anomalies above the reservoir. Using specially designed mini-apparatus [6], microseepage fluxes were measured in argillites and sandstones. These experiments showed that gas-species ratios stabilize after equilibrium microseepage flux is achieved, while gas concentrations are inversely proportional to the distance from the gas source. Based on the equilibrium establishment time, both the velocity of hydrocarbon gas microseepage and the total flux of hydrocarbons migrating from the reservoir can be estimated within the framework of the microseepage model. Furthermore, analysis of the vertical distribution curves of hydrocarbon components within the stratigraphic section, calibrated by geochemical methods such as core analysis or hydrocarbon gas logging, allows prediction of the depth of a potential reservoir with high probability.

Nevertheless, in practical geochemical surveys, confident detection of upward hydrocarbon

fluxes using conventional geochemical methods remains problematic. Variations in the sorption properties of soils – depending on mineral composition, redox conditions, microbiological activity, and other factors – significantly modify the signatures of geochemical and geophysical anomalies, complicating the delineation of anomaly contours.

Firstly, many soil types exhibit poor sorption capacity for hydrocarbons due to specific mineralogical properties, pH levels, and related characteristics.

Secondly, during sampling, more than 50 % of the hydrocarbons present in soils may be lost through volatilization during collection, transportation, and storage.

Thirdly, the hydrocarbon microseepage flux is characterized by very low concentrations, which complicates the direct detection of hydrocarbons by conventional analytical methods used to measure their content in soils. An increase (enrichment) of concentration is therefore required, which predetermines the use of sorbents with sufficiently long exposure times.

Fourthly, both the rates of hydrocarbon microseepage and hydrocarbon concentrations near the surface can vary considerably over time. It has been demonstrated [7] that surface seepages and associated soil geochemical anomalies may appear and disappear within relatively short time intervals – from weeks to months or years – depending on reservoir pressure variations.

Positive results in the detection of geochemical anomalies have been reported using electrical prospecting methods with induced polarization [8]. However, a significant drawback of this approach is the complexity of data interpretation.

A more promising way to detect microseepage flux anomalies involves the use of sorptive materials. Internationally, the GORE-AGI method (<https://agisurveys.net/our-technology.html>) is well known abroad; however, the company does not disclose the specific sorbent material employed in geochemical surveys. It is known that the sorbent must be isolated from water, typically by encapsulation in a waterproof membrane. This design restricts the direct application of the method in marine environments at depths greater than 20 m, where the membrane cannot withstand hydrostatic pressure. Consequently, the

challenge is to select a suitable sorbent capable of retaining activity in aquatic environments, thereby overcoming the depth limitations of conventional sorbent technology.

One of the most widely applied sorbents in this context is zeolite. Zeolites are hydrated calcium and sodium aluminosilicates belonging to the subclass of framework silicates. The most common fraction of zeolites has the chemical formula $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. The efficiency of zeolites as sorbents of light hydrocarbons is determined by their microporous molecular framework: pore sizes reach up to 1 nm (10 Å), while the molecular diameter of methane is only 0.38 nm.

The experiment technique and results

An experiment with deployment of hydrocarbon traps was conducted at the Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, aimed to assess the capacity of sorbents to capture hydrocarbon molecules in seawater at low concentrations of flux from underlying sediments [9]. This experiment was a preparatory step before its further implementation in field conditions. Zeolitized tuffs from the Ogonkovsky site of the Lyutogskoye deposit (Sakhalin Isl.) with a zeolite content of 50 % were used as sorbents. These zeolitized tuffs have shown excellent sorption indicators with respect to hydrocarbons. So, when water with an oil content of 280 mg/l was passed through a zeolite suspension of 30 g at a rate of 1.7 m per hour, the oil content decreased to 12 mg/l after one cycle, i.e. 95.8 % of the oil was captured from the water. At that, zeolitized tuff does not lose its adsorption and catalytic activity when heated to 400–500 °C [10].

Tests of sorbent traps were carried out in a container simulating near-bottom marine conditions above a hydrocarbon reservoir. The upward migration of hydrocarbon molecules in dissolved form within the water column, rather than through true microseepage, occurs due to the excess of capillary pressure. Nevertheless, this setup is sufficient for evaluating the sorption properties of the considered mechanism.

The experimental container was a 200-liter barrel (Figures 3, 4). A clay loam soil layer was placed at the bottom, into which 200 ml of a mixture of gasoline, kerosene, and diesel fuel in a volumetric ratio of 1:1 was added. The hydrocarbon composition of the mixture included the following fractions: $\text{C}_5\text{--C}_9$, $\text{C}_8\text{--C}_{15}$, $\text{C}_{12}\text{--C}_{20}$. Under uniform distribution, the volumetric concentration of hydrocarbons in the container was about 1000 ppm.

The traps contained sorbents made of zeolite, both untreated and pre-calcined in a microwave oven [11], as well as sorbents prepared from peat. For the peat sorbent, weakly decomposed high-moor sphagnum peat species were selected. Microwave calcination was used to dry the sorbent and remove possible contaminants. Three samples (laboratory numbers 1, 2, 3) from the obtained series of sorbents were exposed in the soil layer of the container, while other three samples (numbers 4, 5, 6) were sent directly to the laboratory without storage in the container with petroleum products.

Taking into account the artificial origin of the experimental medium, the traps were remained in the container for five months to ensure the distribution of hydrocarbons throughout the entire volume of the container. After exposure, all samples were preserved in dichloromethane.

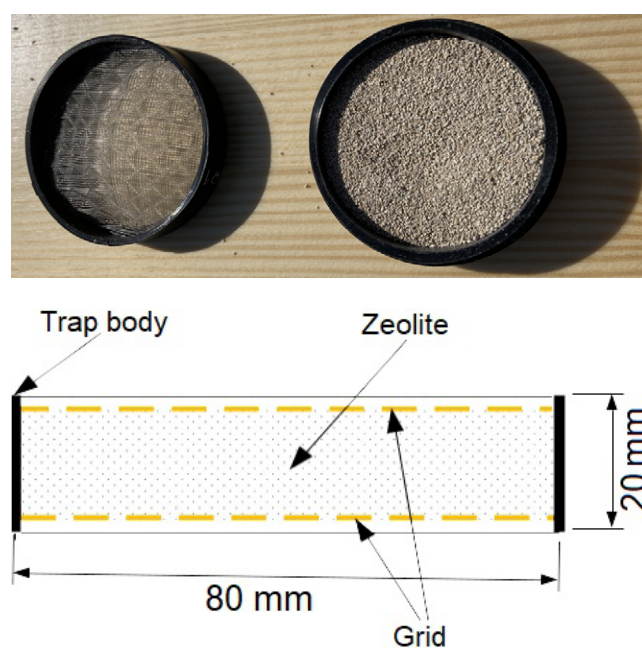


Fig. 3. Image and the design of the trap with sorbent.

Рис. 3. Вид и конструкция ловушки с сорбентом.

Analysis of the sorbent samples was carried out at the Testing Center “MGULAB” (Moscow) using a fluorimetric method with the “Fluorat-02” liquid analyzer, in accordance with methodology PND F 16.1:2.21-98. It is noteworthy that for zeolite sorbents, the measurement errors of petroleum hydrocarbon content remained within the permissible limits specified by PND F 16.1:2.21-98, i.e., less than 28 ppm, whereas for peat sorbents the errors exceeded the allowable values.

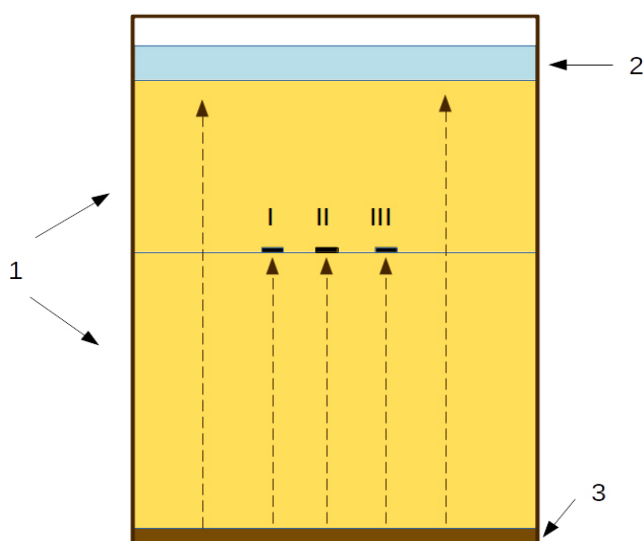


Fig. 4. A container for experiment carrying out. 1, soil saturated with seawater; 2, a layer of seawater; 3, soil saturated with a mixture of hydrocarbons C_5-C_{20} . Traps with sorbents: I, calcined zeolite; II, raw zeolite; III, peat.

Рис. 4. Емкость для проведения эксперимента. 1 – грунт, насыщенный морской водой, 2 – слой морской воды, 3 – грунт, насыщенный смесью углеводородов C_5-C_{20} . Ловушки с сорбентами: I – цеолит прокаленный, II – цеолит сырой, III – торф.

The test results are presented in the table.

Comparable and sufficiently high hydrocarbon content values were observed in untreated peat sorbents (an increase of about 10 % after exposure). For the untreated zeolite sorbent (see table), a rather unusual result was obtained – almost a twofold decrease in petroleum hydrocarbon content after exposure. This reflects the level of contamination in the raw zeolite, as an automobile highway (Yuzhno-Sakhalinsk–Kholmsk) passes near the quarry with zeolitized interbeds. By contrast, for calcined zeolite the hydrocarbon content after exposure in the container increased more than three times (55 vs 15.2 ppm). For these samples, the difference between pre- and post-exposure hydrocarbon concentrations clearly exceeds the measurement error range, despite the relatively high value (nearly 40 %) of error interval. This result contrasts with the data obtained for peat samples and, even more significantly, for untreated zeolite samples.

It is evident that the hydrocarbon concentrations detected in untreated samples No. 4 and No. 6 represent contamination accumulated by peat and zeolite sorbents under natural environmental conditions. Considering the measurement error, it can be concluded that in these samples the hydrocarbon content did not significantly increase after storage in the container.

Thus, one can conclude on the ground of the experimental results that even low hydrocarbon concentrations in environments analogous to near-bottom marine sediments are effectively captured by sorbents made of calcined zeolite.

Table 1. The content of petroleum product in sorbents before and after storage in a container

Таблица. Содержание нефтепродуктов в сорбентах до и после выдержки в емкости

Sorbent, treatment (amount) Sample number	Mass fraction of petroleum products, ppm	Error: at $k = 2$, $P = 0.95$, ppm
Untreated peat (2.0 g)		
1	119	48
4	108	43
Calcined zeolite (16.0 g)		
2	55	22
5	15.2	6.1
Untreated zeolite (20.0 g)		
3	16.3	6.5
6	29	12

Notes. Samples No. 1, 2, 3 – values of the indicator are after 5 months storage in a container. Samples No. 4, 5, 6 were not placed in a container. k = coverage factor.

Примечания. Образцы № 1, 2, 3 – показатель после выдержки в емкости в течение 5 мес. Образцы № 4, 5, 6 в емкости не экспонировались. k = коэффициент охвата.

Conclusion

The results of the experiment using zeolitized tuffs from the Lyutogskoye deposit to detect low concentrations of hydrocarbons in media analogous to bottom sediments have confirmed the feasibility of employing this sorbent as an indicator of hydrocarbon microseepage above subsurface reservoir. Thereafter the next tests at actual hydrocarbon fields, this method may be widely used as an effective tool for identifying the presence of hydrocarbons within reservoir structures. To carry out such tests, the involvement of the state company *Rosgeologia* or oil and gas field operators will be required.

References

- Schumacher D. **2012**. Pre-drill prediction of hydrocarbon charge: microseepage – based prediction of charge and post-survey drilling results. *GeoConvention 2012 abstract archive*. May 14–18, 2012, Calgary, AB, Canada. URL: <https://geoconvention.com/2012-abstract-archive/> (accessed 01.06.2025).
- Klusman R.N., Said M.A. **1996**. Comparison of microseepage mechanisms of light hydrocarbons. In: Schumacher D., Abrams M. (Eds) *Hydrocarbon migration and its near-surface expression*. The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, USA, p. 157–168.
- Wang G., Tang J., Tang Yu., Li X., Li J., Yang Jun, Huang X. **2017**. Simulation of microseepage of light hydrocarbon of different occurrence states in strata above reservoirs. *Petroleum Geology & Experiment*, 39(2): 261–266. doi:10.11781/sysydz201702261
- Wang G., Tang Yuping, Cheng T., Tang Junhong, Fan M., Lu Li. **2016**. Laboratory simulation of the formation process of surface geochemical anomalies applied to hydrocarbon exploration. *Acta Geologica Sinica – English Edition*, 90(6): 2149–2162. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13028>
- Wang G., Qian Q., Klusman R.W., Wang M., Han Zuozhen. **2023**. Experimental study on vertical light hydrocarbon microseepage mechanisms. *Petroleum Science and Technology*, 41: 2257–2276. <https://doi.org/10.1080/10916466.2022.2108051>
- Huang Ch., Wang G., Lu Li, Yang Fan, Gao Junyang. **2013**. Micro-seepage of hydrocarbon gas in mudstone and sandstone and its significance for oil and gas exploration. *Petroleum Geology & Experiment*, 35(4). doi:10.11781/sysydz201304445
- Schumacher D. **2001**. The dynamic nature of hydrocarbon microseepage: An overview. In: *Near-surface hydrocarbon migration: Mechanisms and seepage rates, September 16–19, 2001, Vancouver, Bc, Canada. AAPG Hedberg Conferenc*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/242202285>.
- Ageenkov E.V., Sitnikov A.A., Pesterev I.Y. **2018**. Display of induce polarization different types in electromagnetic measurements by the line. *Geophysics*, 2: 37–43. (In Russ.). URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/publications/ibc/2018/gf-2018-1-37-43.pdf> (accessed 07.08.2025).
- Bulgakov R.F., Bogomolov L.M. **2024**. Application of sorbents in geochemical prospecting methods. In: *X International scientific and technical conference. Development of oil and gas resources of the Russian shelf: Arctic and Far East (OMNR-2024), June 19–21, 2024: report summary*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, p. 17. (In Russ.).
- Gorokhov V.K., Dunichev V.M., Mel'nikov O.A. **1982**. *Sakhalin zeolites*. Vladivostok: Dal'nevostochnoye knizhnoye izdatel'stvo, 106 p. (In Russ.)
- Savinsky N.G. **2014**. [Microwave heating of intercalated graphite]. *Vestnik Yaroslavskogo gosudarstvennogo universiteta im. P.G. Demidova. Seriya Yestestvennye i tekhnicheskiye nauki*, 1: 76–87. (In Russ.).

About the Authors

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

Об авторах

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

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

Received 28 May 2025
Accepted 7 July 2025

Поступила 28.05.2025
Принята к публикации 07.07.2025

© 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)

ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЕ УЧЕНЫЕ

УДК 551.21

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.3.332-340>

<https://www.elibrary.ru/ttepcw>

Вулканологические исследования на Сахалине и Курильских островах под руководством В.Н. Шилова в 1958–1971 годах (из истории ИМГиГ ДВО РАН)

The volcanological studies in Sakhalin and the Kuril Islands under the leadership of Vsevolod N. Shilov in 1958–1971 (from the history of IMGG FEB RAS)

*И. П. Кремнева[@], О. В. Веселов,
А. В. Дегтерев, М. В. Чибисова*

[@]E-mail: i.kremneva@imgg.ru

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

*Irina P. Kremneva[@], Oleg V. Veselov,
Artem V. Degterev, Marina V. Chibisova*

[@]E-mail: i.kremneva@imgg.ru

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

Резюме. В очерке описаны начало, развитие и результаты первых вулканологических исследований под руководством Всеволода Николаевича Шилова в СахКНИИ АН СССР (Сахалинском комплексном научно-исследовательском институте Академии наук СССР) в 1958–1971 гг., а также история создания в нем лаборатории вулканологии.

Ключевые слова: история вулканологических исследований, Сахалин, Курильские острова

Abstract. The paper describes the initiation, development, and results of the first volcanological studies under the leadership of Vsevolod Nikolaevich Shilov conducted by SakhKNII AS USSR (Sakhalin Integrated Research Institute of the Academy of Sciences of the USSR) from 1958 to 1971, as well as the history of the establishment of the Laboratory of volcanology.

Keywords: history of volcanological studies, Sakhalin, Kuril Islands

Первые вулканологические исследования на Сахалине и Курильских островах были начаты сразу после создания в 1946 г. на юге о. Сахалин, в пос. Ново-Александровск, Научно-исследовательской базы Академии наук СССР. Одной из приоритетных задач научного учреждения было изучение геологического строения Сахалина и Курильских островов и предварительная оценка прогнозных запасов минеральных и энергетических ресурсов на этих территориях. О предпосылках и об-

стоятельствах создания академического научного учреждения на Сахалине рассказывается в юбилейных публикациях об Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН [1–3].

В 1949 г. база была переименована в Сахалинский филиал Академии наук СССР (СФ АН СССР). Сюда после окончания с отличием геологического факультета Иркутского государственного университета им. А.А. Жданова в 1953 г. был направлен Всеволод Николаевич Шилов.

Все фото, на которые нет ссылки, – из Архива ИМГиГ ДВО РАН.

All photos without the reference are taken from the archive of the IMGG FEB RAS.



Всеволод Николаевич Шилов (1931–2003), 1953 г.

В мае 1955 г. СФ АН СССР по приказу Президиума АН СССР был преобразован в Сахалинский комплексный научно-исследовательский институт (СахКНИИ) АН СССР с продолжением прежней программы исследований.

С первого года работы в СФ АН СССР В.Н. Шилов занялся изучением кайнозойских проявлений вулканизма на юго-западе о. Сахалин. В эти годы расширялась территория исследований вулканизма, был проведен углубленный анализ этапности его проявлений. Шиловым были выделены три вулканические фазы. Первая продолжалась, предположительно, с конца олигоцена до конца миоцена и характеризовалась в основном андезито-дацитовым вулканизмом, вторая относится к среднему миоцену, и ее вулканы имеют более основной состав, третья фаза протекала с конца позднего миоцена до позднего плиоцена, отличается полным спектром петрохимического состава – от базальтов до дацитов [4].

В результате петрохимического изучения продуктов кайнозойского вулканизма на юге Сахалина Шилов выделил среди них извест-

ково-щелочную и субщелочную серии пород. Было также доказано, что многие согласно залегающие магматические тела в стратифицированных осадочных толщах являются интрузиями (силлами), а не потоками лав, за которые их обычно принимали. Обнаружен и детально описан специфический комплекс подводных шаровых лав и гиалокластитов.

На основе проведенных исследований Шилов подготовил и защитил в 1958 г. диссертацию на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук «Кайнозойский вулканизм и кайнозойские вулканогенные формации западной части южного Сахалина». Научным руководителем был д.г.-м.н., профессор Владимир Иванович Влодавец (<http://www.polarpost.ru/forum/viewtopic.php?f=8&t=2262>). Этот результат позволяет назвать В.Н. Шилова основателем палеовулканологии Сахалинского региона. Впоследствии он стал известным палеовулканологом.

1957 г. был объявлен Международным геофизическим годом (МГГ). По программе МГГ в 1957–1958 гг. СахКНИИ СО АН СССР принял участие в сейсмических исследованиях, в ходе которых на Дальнем Востоке изучалось глубинное строение зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. В 1958 г. в связи с необходимостью усиления геологических и геофизических фундаментальных исследований глубинного строения региона в структуру института были внесены значительные изменения и созданы три новые лаборатории: прикладной геофизики, геофизических исследований в скважинах и вулканологии.

Лаборатория вулканологии в СахКНИИ СО АН СССР была создана по инициативе замечательного ученого-вулканолога Софьи Ивановны Набоко (https://geologyscience.ru/geologists/geologists_list/naboko-sofya-ivanovna/) согласно решению I Всесоюзного вулканологического совещания о расширении изучения активного вулканизма в Советском Союзе и, в частности, на Курильских островах. Заведующим ее был назначен Всеволод Николаевич Шилов. И на протяжении 12 лет

бессменно руководил ею. Он отдал много сил и энергии развитию вулканологического направления на Сахалине и воспитанию научных кадров. Известные вулканологи Владимир Иванович Федорченко, Раиса Ивановна Родионова, Владимир Федорович Ерохов, Вадим Филимонович Остапенко, Иван Петрович Аверьянов вышли из этой лаборатории.

С 1959 г. началось планомерное изучение Курильских островов. Шилов руководил рекогносцировочными исследованиями северной группы Курильских островов. Работал на вулканах Алаид (о. Атласова), Эбеко, Чикучаки, Татарина, Карпинского, Пик Фусса (о. Парамушир). В 1960 г. прибыл на о. Матуа для описания последствий извержения вулкана Пик Сарычева, которое произошло 30 августа 1960 г. [5].

На о. Парамушир при его участии был основан полигон на хребте Вернадского для детального изучения проявлений современного

вулканизма комплексными геолого-геофизическими методами [6]. В течение нескольких лет сахалинские ученые изучали геологическое строение четвертичных вулканов, минералогический, структурный, химический состав продуктов вулканизма, распределение в них химических элементов, в том числе малых, описывали гидротермальные проявления, их химизм, гидротермальные изменения продуктов извержения. Кроме того, сделано описание древних оледенений на о. Парамушир и т.д.

Впервые были проведены геофизические исследования парамуширских вулканов. В.А. Бернштейн осуществил наземную магнитометрическую съемку для изучения внутреннего строения вулканов Эбеко и Влодавца. С.С. Сивожелзов провел гравиметрические измерения ускорения силы тяжести в широтном и меридиональном направлениях в районе этих вулканов. При исследованиях вводились поправки на рельеф, ошибки измерений. Были



Сахалинская научно-исследовательская база Академии наук СССР. 1946 г.
(ныне – Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН).

Sakhalin base of the Academy of Sciences of the USSR in 1946
(now the Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS).

выявлены аномалии, обусловленные гидротермальными изменениями пород, структурными неоднородностями, контрастами плотностей на контактах пород основания и отложений четвертичных лав. Радиометрические измерения, проведенные в небольшом объеме на этих вулканах, показали распределение нормального фона, порядка 10–20 мкР/ч. Результаты геологических и геофизических исследований были опубликованы в ряде работ и доложены на тематических конференциях.

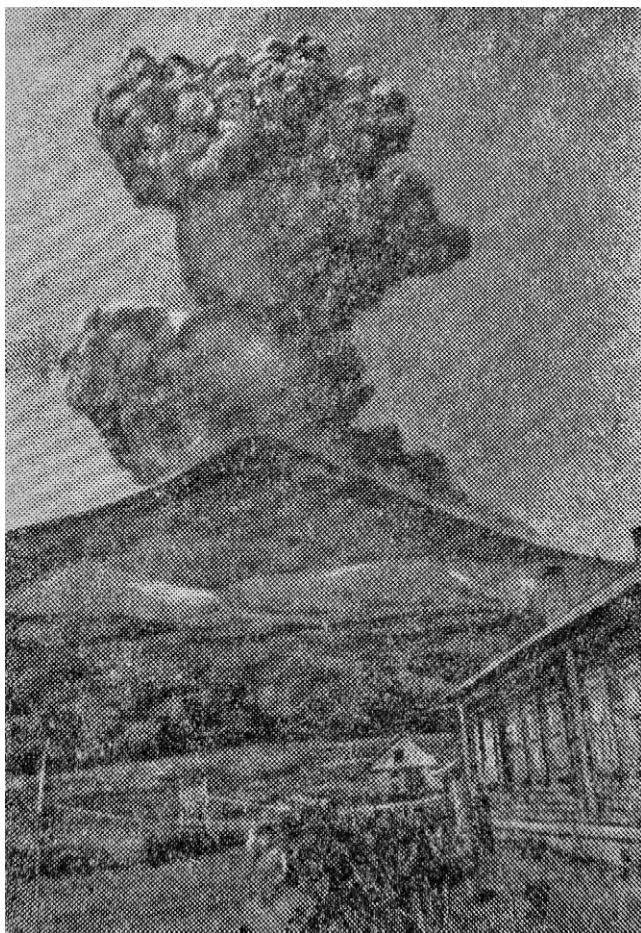
Со временем, когда у сахалинских ученых появился серьезный вулканологический опыт и знания, лаборатория перешла к изучению глубинных аспектов вулканизма, соотношения его с другими эндогенными процессами (сейсмичностью, новейшими тектоническими движениями, метаморфизмом), роли в общей

эволюции земной коры и формировании месторождений полезных ископаемых. В решении этих фундаментальных проблем наряду с традиционными методами большое значение придавалось комплексу геофизических исследований корневых зон вулканов. При решении общепетрологических вопросов вулканологии сотрудники лаборатории концентрируются на вопросах петрохимии, в частности работают над совершенствованием ее методических основ [7].

Коллектив сотрудников под руководством Шилова сосредоточил свое внимание на морфологических и структурных особенностях действующих и потухших вулканов Курильских островов, выяснении петрологической природы лав и других продуктов извержений, механизмов вулканических извержений. Изучались также проявления современной вулканической активности на Курильских островах и их последствия.

Продолжилось исследование вулканов о. Парамушир, где известны единственные на всей Курильской гряде достоверные следы четвертичных оледенений. Это создавало возможность детального стратиграфического расчленения не содержащих органические остатки четвертичных вулканических толщ и воссоздания истории четвертичного вулканизма района. Такие работы в пределах Курильской дуги были поставлены впервые, и в значительной мере они носили методический характер. В то же время вулканы о. Парамушир привлекали к себе внимание в связи с широким развитием в их прижерловых частях гидротермально измененных пород, вмещающих значительное по масштабам серное оруденение.

В результате проведенных исследований В.Н. Шиловым, В.И. Федорченко, Р.И. Родионовой, С.С. Сидоровым, Л.Г. Вороновой, И.П. Аверьяновым были получены исчерпывающие сведения о геологическом строении большинства вулканов о. Парамушир, их современной и древней вулканической и гидротермальной деятельности и ее продуктах, восстановлена история формирования вулканов, высказаны соображения о генезисе



Начальный момент извержения вулкана Пик Сарычева
30 августа 1960 г. Фото В.В. Брага [5]

The initial moment of the eruption of Sarychev Peak volcano
on August 30, 1960. Photo by V.V. Braga [5]

пород андезитовой формации. Установлено, что четвертичные вулканические образования острова относятся к своеобразному линейно-кустовому типу, который сочетает в себе черты центрального, ареального и трещинного вулканизма и является наиболее перспективным в отношении возможности образования промышленных скоплений самородной серы кратерно-озерного, импрегнационного и сублимационного типов. И.П. Аверьяновым предложен новый вариант генетической классификации этих месторождений.

На основе изучения характера изменения химического состава гидротерм и интенсивности геомагнитного поля на вулкане Эбеко были высказаны предположения о нарастании активности вулкана, а в марте 1963 г. там произошло газовое извержение, которое детально изучалось сотрудниками лаборатории вулканологии. Подробные рекомендации по изучению и разведке вулканических серных месторождений этого района были переда-

ны Сахалинскому геологическому управлению, которое позднее проводило на Курильских островах поисково-разведочные работы на самородную серу.

Параллельно с плановыми исследованиями на Северных Курильских островах изучались отдельные вулканы и на Центральных и Южных Курилах. Более глубоко был изучен вулкан Головнина на о. Кунашир, обследованы почти все вулканы о. Симушир и некоторые вулканы о. Итуруп. Особое внимание уделялось исследованию вулканов в периоды их извержений. Были проведены наземные и аэровизуальные наблюдения извержений вулканов Пик Сарычева (о. Матуа) в 1960 г., Чикурачки в 1961 г. и Эбеко (о. Парамушир) в 1963 и 1967 гг. Вулканологам института удалось наблюдать такие интересные вулканические явления, как излияния потоков жидкой серы, мощные пепло-газовые взрывы, возникновение крупных фумарол, образование и движение огромных грязекаменных потоков (лахаров).



Вулкан Эбеко – один из самых активных в последние годы вулканов Курильских островов (о. Парамушир). На снимке запечатлен момент пепловой эксплозии в сентябре 2020 г. Фото С.З. Смирнова

Ebeko Volcano, one of the most active volcanoes of the Kuril Islands in recent years (Paramushir Island). The photo shows the moment of the ash explosion in September 2020. Photo by S.Z. Smirnov

В 1961–1962 гг. С.С. Сидоров детально изучил месторождение горячей воды и пара «Горячий пляж» на о. Кунашир. Он определил величину теплосодержания пароводяной смеси и установил, что температура воды на глубине составляет не менее 130 °С. Рекомендации по разведке гидротермального месторождения и практическому использованию вулканического тепла, прежде всего для организации крупного тепличного хозяйства, были переданы Сахалинскому геологическому управлению и Сахалинскому облисполкому. Эти рекомендации были в основном реализованы.

На протяжении 1959–1965 гг. специальным изучением кайнозойского вулканизма о. Сахалин совместно с В.Н. Шиловым занимался В.Ф. Ерохов. Ими были исследованы разрезы неогеновых вулканогенных образований восточной части Южного Сахалина и северной половины острова, установлены петрохимические особенности средних и кислых пород среди продуктов среднемиоценового вулканизма, подробно описаны ранее неизвестные вулканические образования субщелочного ряда на Охотском побережье центрального Сахалина.

В.Ф. Остапенко и Е.Н. Кичина, приехавшие на о. Сахалин в институт в 1963 г. и начавшие свою работу на Курильских островах, занимались преимущественно изучением вещественных особенностей магматических образований [8].

С 1964 г. в соответствии с решением Президиума АН СССР и СО АН СССР научные сотрудники института и, в частности, коллектив лаборатории вулканологии сосредоточили силы на разработке проблемы «Строение и развитие земной коры и верхней мантии в зоне перехода от Азиатского континента к Тихому океану». Основное внимание было сконцентрировано на изучении вулканов и продуктов их деятельности как первостепенных

источников информации о вещественном составе глубин нашей планеты.

В период 1964–1968 гг. выполнялись работы по теме «Действующие вулканы Курильских островов как индикатор глубинных процессов». В связи с этим проводились сравнительные исследования вулканов, расположенных в зонах, в которых по геофизическим данным более глубоко изучено строение земной коры. Особое значение придавалось сбору и изучению ксенолитов, которые являются вероятными представителями вещества различных глубинных зон, т.е. дают прямую информацию о вещественном составе глубинных недр Земли.

Для выполнения этих работ лаборатория вулканологии располагала квалифицированными научными кадрами. Среди ведущих вулканологов в эти годы следует отметить Б.Н. Пискунова, В.Ф. Остапенко, В.М. Гранника, Р.И. Родионову, А.И. Абдурахманова [2].

К концу 1960-х годов в той или иной мере были изучены вулканы практически всех крупных островов гряды, создана их классификация, оценены перспективы сероносности. На Сахалине проведена реконструкция центров древнего вулканизма, высказаны соображения о роли этого процесса в формировании



В.Н. Шилов за изучением коллекции образцов. Фрагмент из архивного видео
V. N. Shilov studying the collection of samples. A frame from the archival video

земной коры. Кроме того, Шилов в числе первых принимал активное участие в изучении проявлений грязевого вулканизма о. Сахалин.

Высокая научная квалификация сахалинских вулканологов способствовала подготовке ими диссертационных работ, которые были успешно защищены: В.И. Федорченко – в 1965 г.; В.Ф. Остапенко, Б.Н. Пискуновым, Н.А. Соловьевой – в 1969-м; В.К. Гавриловым, Р.И. Родионовой – в 1970 г.

В целях повышения эффективности научных исследований в 1970 г. лаборатория вулканологии была объединена с лабораторией геологии островных дуг с сохранением тематики по вулканологии. В.Н. Шилову предложили возглавить группу вулканологии. Но Всеволод Николаевич 5 августа 1970 г. уволился из СахКНИИ с целью переезда в Москву.

В Москве им была подготовлена докторская диссертация «Вулканизм Сахалина и Курильских островов», в которой был осуществлен синтез научной информации по палеозойско-мезозойско-кайнозойскому вулканизму этих островов. Диссертацию он успешно защитил в 1975 г. в Сибирском отделении АН СССР.

В.Н. Шилов долгие годы сотрудничал с таким корифеем вулканологической науки, как И.В. Лучицкий, который создал в Институте литосферы АН СССР (в 2004 г. объединен с Геологическим институтом РАН) лабораторию палеовулканологии. После кончины И.В. Лучицкого Шилов в начале 1980-х годов взял на себя руководство этой лабораторией. При этом он продолжал разработку комплекса методов по изучению вулканизма. Одним из главных методов он считал формационный анализ и неизменно следовал его принципам во всех своих построениях. Не меньшее внимание уделял проблемам тектоники и магматизма, считая, что магматизм невозможно изучать в отрыве от геодинамических и общегеологических процессов.

В отечественной науке Шилов стал широко известен как ученый высокой, мирового уровня научной квалификации, главным направлением исследований которого являлся вулканизм в различных его проявлениях и геодинамических обстановках. Всеволод Николаевич всегда чрезвычайно внимательно относился к сотрудникам возглавляемой им лабо-



На Пугачевском грязевом вулкане, 1950-е гг.
At the Pugachev mud volcano (1950s)



Сотрудники СахКНИИ кандидаты геолого-минералогических наук Всеволод Николаевич Шилов (слева), Иван Маркович Сирьк (в центре) и Олег Александрович Мельников – пионеры изучения грязевого вулканизма о. Сахалин, 1960-е гг.

Vsevolod Nikolaevich Shilov, Ivan Markovich Siryk, and Oleg Aleksandrovich Melnikov (left to right), Candidates of the Geological and Mineralogical Sciences and researchers of SakhKNII, were the pioneers of the research of mud volcanology on Sakhalin (1960s).

ратории, особенно поощрял молодых ученых, помогая найти свой исследовательский путь. Научный стаж В.Н. Шилова в целом составляет 51 год. Он автор 150 научных работ по проблематике вулканизма и региональной геологии. Являлся заместителем главного редактора журнала «Вулканология и сейсмология», заместителем председателя Всероссийской комиссии по вулканизму и химии недр Земли при Геофизическом комитете РАН, членом Палеовулканологической комиссии при Петрографическом комитете РАН, а также членом региональной Европейской палеовулканологической комиссии.

Всеволод Николаевич был трудолюбивым и целеустремленным ученым и необыкновенно скромным и доброжелательным человеком, причем эти его замечательные качества несколько не менялись на протяжении всей его жизни [9].

Отмечая вклад Шилова в вулканологические исследования на Сахалине и Курильских

островах, можно сказать, что без таких преданных науке людей, как Всеволод Николаевич, невозможны были бы результаты, которых добился небольшой коллектив лаборатории сахалинского института на заре становления отечественной вулканологии.

Список литературы

1. Веселов О.В., Кордюков А.В., Богомолов Л.М., Дегтерев А.В., Закупин А.С., Ковалев Д.П., Прытков А.С., Сабиров Р.Н. **2021**. Институту морской геологии и геофизики – 75 лет. *Вестник ДВО РАН*, 2: 147–162. doi:10.37102/0869-7698_2021_216_02_15
2. *Институту морской геологии и геофизики – 60 лет. Страницы истории*. **2006**. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 153 с.
3. Ильев А.Я. **2006**. Академическая наука на Сахалине: страницы истории. *Вестник ДВО РАН*, 1: 6–17.
4. Шилов В.Н. **1957**. Кайнозойский вулканизм Южного Сахалина. *Бюллетень МОИП. Отдел геологический*, 32(6): 137–138.
5. Шилов В.Н. **1962**. Извержение вулкана пик Сарычева в 1960 г. *Труды СахКНИИ СО АН СССР*, 12: 143–149.

6. *Опыт комплексного исследования района современного и новейшего вулканизма (на примере хр. Вернадского, о. Парамушир)*. Под ред. С.И. Набоко. 1966. Южно-Сахалинск, 206 с. (Труды СахКНИИ СО АН СССР; 16).
7. Федорченко В.И. 1978. Двадцать лет вулканологических исследований на Сахалине. *Дальневосточный ученый*, 24(232) от 7 июня 1978 г.
8. Ерохов В.Ф., Шилов В.Н. 1970. Неогеновые вулканогенные образования. *Геология СССР*. Т. 33. *Остров Сахалин. Геологическое описание*. М.: Недра, 241–254.
9. Памяти Всеволода Николаевича Шилова (1931–2003). 2004. *Литосфера*, 3: 153–154.
3. Iliev A. Ya. 2006. [Academic science on Sakhalin: pages of history]. *Vestnik of the FEB RAS*, 1: 6–17. (In Russ.).
4. Shilov V.N. 1957. Cenozoic volcanism of South Sakhalin. *Byulleten Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody (MOIP). Otdel geologicheskiiy = Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological series*, 32(6): 137–138. (In Russ.).
5. Shilov V.N. 1962. [Eruption of Sarychev Peak volcano in 1960]. *Trudy SakhKNII SO AN SSSR*, 12: 143–149. (In Russ.).
6. [Experience of a comprehensive study of the region of modern and recent volcanism (on the example of the Vernadsky Ridge, Paramushir Island)]. Ed. S.I. Naboko. 1966. Yuzhno-Sakhalinsk, 206 p. (Trudy SakhKNII SO AN SSSR; 16). (In Russ.).
7. Fedorchenko V.I. 1978. [Twenty years of volcanological studies on Sakhalin]. *Dal'nevostochnyy uchenyy*, 24(232), 7 June 1978. (In Russ.).
8. Erohov V.F., Shilov V.N. 1970. Neogene volcanogenic formations. In: *Geologiya SSSR. Vol. 33. Sakhalin Island. Geological description*. Moscow: Nedra, p. 241–254. (In Russ.).
9. In memory of Vsevolod Nikolaevich Shilov (1931–2003). 2004. *Lithosphere (Russian Federation)*, 3: 153–154. (In Russ.).

References

Об авторах

Сотрудники лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия:

Кремнева Ирина Петровна (<https://orcid.org/0009-0004-9406-0449>), руководитель отдела информационно-аналитического сопровождения научной деятельности, i.kremneva@imgg.ru

Веселов Олег Васильевич (<https://orcid.org/0000-0003-3151324X>), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности

Дегтерев Артем Владимирович (<https://orcid.org/0000-0001-8291-2289>), кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией вулканологии и вулканопасности, d_a88@mail.ru

Чибисова Марина Владимировна (<https://orcid.org/0000-0003-0677-6945>), старший научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности, m.chibisova@imgg.ru

About the Authors

Employees of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia:

Kremneva, Irina P. (<https://orcid.org/0009-0004-9406-0449>), Head of the Department of information and analytical support of scientific activities, i.kremneva@imgg.ru

Veselov, Oleg V. (<https://orcid.org/0000-0003-3151324X>), Cand. of Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard

Degterev, Artem V. (<https://orcid.org/0000-0001-8291-2289>), Cand. of Sci. (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory of volcanology and volcanic hazard, d_a88@mail.ru

Chibisova, Marina V. (<https://orcid.org/0000-0003-0677-6945>), Senior Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard, m.chibisova@imgg.ru

Поступила 02.07.2025

Принята к публикации 17.08.2025

Received 2 July 2025

Accepted 17 August 2025