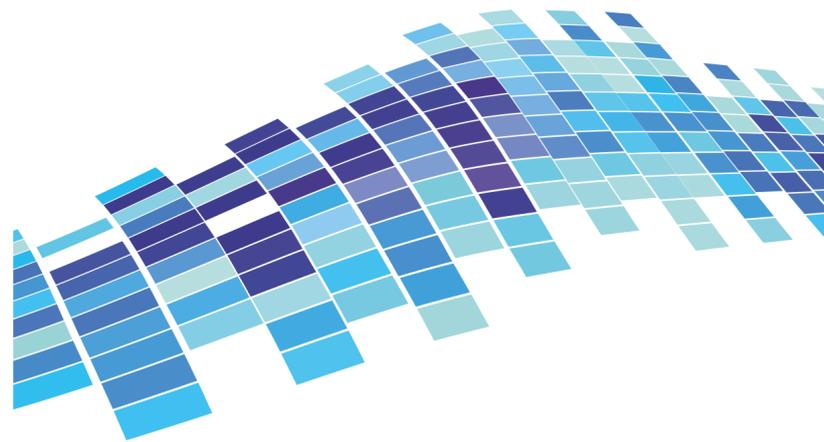


ISSN 2541-8912 (Print)
ISSN 2713-2161 (Online)

ГЕОСИСТЕМЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН



GEOSYSTEMS
of Transition Zones

2022 **ТОМ 6** **№ 2**

Научный журнал

Учредитель и издатель:

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Издается с 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 Journal mission is informing of international scientific community about results of researches in the geosystems of Earth transition zones and related problems in Geophysics, Geology, Geodynamics, Seismology, Geoecology and other sciences.

Журнал:

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

25.00.01. Общая и региональная геология
(*геолого-минералогические*)

25.00.03. Геотектоника и геодинамика
(*геолого-минералогические*)

25.00.35. Геоинформатика
(*физико-математические*)

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

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*)

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

1.5.15. Экология
(*биологические*)

The Journal is:

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

25.00.01. General and regional geology
(*Geology and Mineralogy*)

25.00.03. Geotectonics and Geodynamics
(*Geology and Mineralogy*)

25.00.35. Geoinformatics
(*Physics and Mathematics*)

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

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*)

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

1.5.15. Ecology
(*Biology*)

Адрес учредителя и издателя

ИМГиГ ДВО РАН
ул. Науки, 16, Южно-Сахалинск, 693022
Тел./факс: (4242) 791517
E-mail: gtrz-journal@mail.ru
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, 2022

Редакционная коллегия*Главный редактор*

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

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

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

Editorial Board*Editor-in-Chief*

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Executive Secretary

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

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

Редакционная коллегия

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

Editorial Board

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

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

Переводчик Качесова Галина Сергеевна

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

Типография: 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.

<http://www.imgg.ru>

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 6,4.

Тираж 150 экз. Заказ 7983. Свободная цена.

Подписано в печать 28.06.2022.

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

По вопросам распространения обращаться также

E-mail: gtrz-journal@mail.ru

Translator Galina S. Kachesova

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

Publisher: 1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022.

<http://www.imgg.ru>

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 6,4.

Number of copies 150. Order no. 7983. Free price.

Date of publishing 28.06.2022.

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

The Editorial Office can also be contacted by:

E-mail: gtrz-journal@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Геофизика. Сейсмология

Geophysics. Seismology

Д.А. Сафонов, Е.П. Семёнова. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2021 году 85

D.A. Safonov, E.P. Semenova. Seismicity of the South Far East of Russia in 2021 85

Геоморфология и палеогеография

Geomorphology and Palaeogeography

Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, Х.А. Арсланов, Н.Ф. Пишеничникова. Береговые дюны острова Уруп (Курильские острова, северо-западная Пацифика): архив изменений палеоклимата и природной среды (На англ. яз.) 100

N.G. Razjigaeva, L.A. Ganzey, Kh.A. Arslanov, N.F. Pshenichnikova. Coastal dunes of Urup Island (Kuril Islands, North-Western Pacific): palaeoclimatic and environmental archive (In Engl.) 100

Океанология

Oceanology

Д.П. Ковалев, П.Д. Ковалев, А.С. Борисов, В.С. Зарочинцев, К.В. Кириллов. Особенности возбуждения сейш в акватории вблизи Поронайска (о. Сахалин) 114

D.P. Kovalev, P.D. Kovalev, A.S. Borisov, V.S. Zarochintsev, K.V. Kirillov. Features of seiche excitation in the water area near Poronaisk (Sakhalin Island) 114

Геоинформатика. Геотектоника и геодинамика

Geoinformatics. Geotectonics and geodynamics

Р.Ф. Булгаков. Моделирование вертикальных смещений в результате мантийной конвекции на профиле через Охотское море 124

R.F. Bulgakov. Vertical motion modeling as a result of mantle convection on the Sea of Okhotsk profile 124

Вулканология. Геоморфология. Геоэкология

Volcanology. Geomorphology. Geoecology

ЭКСПЕДИЦИИ

EXPEDITIONS

А.В. Дегтерев, Д.Н. Козлов, О.Р. Хубаева, А.Л. Хомчановский. Экспедиция по изучению новых термальных проявлений на о. Итуруп в 2022 г. 130

A.V. Degterev, D.N. Kozlov, O.R. Hubaeva, A.L. Khomchanovskiy. Expedition to study new thermal manifestations on Iturup Island in 2022 130

Экология

Ecology

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

SHORT REPORT

Ю.Н. Полтев, Т.Г. Коренева, В.Е. Марыжихин, И.В. Сырбу. Содержание микроэлементов в дальневосточной мойве *Mallotus catervarius* (Pisces: Osmeridae) из прибрежных вод юго-западной части о. Сахалин 136

Yu.N. Poltev, T.G. Koreneva, V.E. Maryzhikhin, I.V. Syrbu. The content of trace elements in the Pacific capelin *Mallotus catervarius* (Pisces: Osmeridae) from the coastal waters of the southwestern part of Sakhalin Island 136

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



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

УДК 550.34

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.085-099>
<https://www.elibrary.ru/puhfwt>

Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2021 году

Д. А. Сафонов^{*1}, Е. П. Семёнова²

*E-mail: d.safonov@imgg.ru

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

²Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия

Реферат. В работе представлен обзор сейсмичности в 2021 г. южной части Дальнего Востока России: регионов Приамурье и Приморье, Сахалинского и Курило-Охотского, основанный на данных каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН». Приведены регрессионные соотношения между энергетическими характеристиками землетрясений каталога. Рассчитаны основные параметры сейсмичности: статистическая оценка уровня сейсмичности СОУС'09, графики Бенъофа, карты плотности условной упругой деформации; приведена информация о наиболее значимых землетрясениях в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН. По формальным показателям сейсмичность названных регионов в 2021 г. находилась в пределах фоновых значений. Магнитуда сильнейшего из зафиксированных в каталоге 2021 г. землетрясения, произошедшего 20 сентября в пределах Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны на глубине 41 км, составила $M_w = 6.1$. Самое сильное коровое землетрясение Сахалинского региона с $M_{wa} = 4.4$ произошло 18 апреля вблизи пос. Тымовское, где вызвало сотрясения интенсивностью в 5-6 баллов.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмичность, сейсмическая активность, Приамурье, Приморье, Сахалин, Курило-Охотский регион

Seismicity of the South Far East of Russia in 2021

Dmitry A. Safonov^{*1}, Elena P. Semenova²

*E-mail: d.safonov@imgg.ru

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

²Sakhalin Branch of the FRC "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences", Yuzhno-Sakhalinsk

Abstract. The paper presents an overview of the seismicity of the southern part of the Russian Far East for 2021: Amur-Primorye region, Sakhalin and Kuril-Okhotsk region. It is based on data from the catalog of the "Yuzhno-Sakhalinsk" Regional Information Processing Center of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center «United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences». Regression relationships between the energy characteristics of earthquakes in the catalog are given. The main parameters of seismicity are estimated: statistical estimation of seismicity level SESL'09; Benioff diagrams; density maps of conditional elastic deformation. The information about the most significant earthquakes in the responsibility zone of the SF FRC UGS RAS is given. According to formal indicators, the seismicity of these regions in 2021 was within the background values. The magnitude of the strongest earthquake recorded in the catalog of 2021, which occurred on September 20 within the Kuril-Kamchatka seismofocal zone at a depth of 41 km, was $M_w = 6.1$. The strongest crustal earthquake in the Sakhalin region with $M_{wa} = 4.4$ occurred on April 18 near the settlement of Tymovskoe, where it was felt with an intensity of 5-6 points.

Keywords: earthquakes, seismicity, seismic activity, Amur region, Primorye, Sakhalin, Kuril-Okhotsk region

Для цитирования: Сафонов Д.А., Семёнова Е.П. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2021 году. *Геосистемы переходных зон*, 2022 т. 6, № 2, с. 85–99. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.085-099>; <https://www.elibrary.ru/puhfwt>

For citation: Safonov D.A., Semenova E.P. Seismicity of the South Far East of Russia in 2021. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 85–99. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.085-099>; <https://www.elibrary.ru/puhfwt>

Введение

Статья продолжает ежегодный обзор сейсмичности территории юга Дальнего Востока России на основе оперативных определений па-

раметров зарегистрированных землетрясений в Сахалинском филиале Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) в 2021 г. [1–3].

Областью исследования являются Курило-Охотский регион (Курильские острова, о. Хоккайдо, прилегающие к ним акватории северо-западной части Тихого океана, Охотского и Японского морей); Сахалинский регион (о. Сахалин и Татарский пролив); регион Приамурье и Приморье (территория Приморского и Хабаровского краев, Амурской и Еврейской автономной областей, а также приграничные районы Китая и прибрежная часть Японского моря).

Цель работы – представить информацию о сейсмичности южной части Дальнего Востока РФ по оперативным данным. Статья обращает внимание на наиболее интересные и заслуживающие изучения сейсмические события прошлого года, приводит основные параметры сейсмичности в сравнении с предыдущим десятилетием.

Основным отличием данной работы от предыдущих обзоров является переход к использованию нового источника оперативных данных о параметрах землетрясений. С 2021 г. в СФ ФИЦ ЕГС РАН подготовку данных для составления оперативного каталога Приамурья и Приморья, Сахалинского и Курило-Охотского регионов выполняет региональный информационно-обрабатывающий центр (РИОЦ) «Южно-Сахалинск». Объем оперативного каталога значительно возрос, а параметры землетрясений неплохо коррелируют с данными международных сейсмологических агентств. Более подробный анализ качества обработки данных РИОЦ «Южно-Сахалинск» можно найти в отчетах НИР ФИЦ ЕГС РАН¹.

Получаемые параметры землетрясений в РИОЦ «Южно-Сахалинск» имеют определенные отличия от данных оперативного каталога отдела сводной обработки сейсмологических данных, использованного ранее при составлении ежегодных обзоров. В частности, помимо известных и давно применяемых для различных регионов России энергетических характеристик землетрясений [4], в оперативном каталоге РИОЦ широко используется магнитуда M_{wa} . Магнитуда на основе цифровой эмуляции

записи сейсмографа Wood-Anderson M_{wa} является старейшей и хорошо зарекомендовавшей себя энергетической характеристикой [5, 6], однако в практике обработки землетрясений в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН применяется сравнительно недавно. Поэтому в статье приведены межмагнитудные соотношения, полученные на основе данных каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН, необходимые для дальнейшего обзора сейсмичности регионов.

Обзор сейсмичности приводится с использованием основных характеристик: статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09, графиков Беньюфа. Для демонстрации пространственного распределения сейсмической активности приведены карты плотности условной упругой деформации.

Сеть сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 г. по сравнению с предыдущими годами практически не претерпела изменений [2]. К концу 2021 г. сеть сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН насчитывала 48 пунктов непрерывных наблюдений: 38 стационарных, в том числе 18 с обслуживающим персоналом и 20 автоматических, с передачей данных в реальном времени на серверы сбора опорных станций; 10 автономных полевых локальной сети на юге о. Сахалин.

В апреле 2021 г. были установлены два пункта сейсмологических наблюдений в районе активной добычи угля на Солнцевском угольном разрезе (Углегорский район Сахалинской области). Это дает возможность с повышенной точностью контролировать проводимые взрывные работы, а также слабую и возможную наведенную сейсмичность, сформировавшуюся вследствие постоянного техногенного воздействия на недра [7].

Текущая конфигурация сети сейсмических станций, с учетом установленного оборудования и привлечения в оперативном режиме данных со станций Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН и Глобальной сейсмической сети (GSN), позволяет обеспечить на большей части зоны ответственности возможность ре-

¹ Чебров Д.В. (науч. рук.) 2021. Анализ волновых полей сильных землетрясений и параметров их очагов в целях уточнения цунамигенного потенциала при обработке данных системы предупреждения о цунами: отчет о НИР (итоговый). ФИЦ ЕГС РАН. Обнинск, 91 с. № ГР АААА-А19-119031590060. [Chebrov D.V. (scientific director) 2021. Analiz volnovykh polej sil'nykh zemletryasenij i parametrov ih ochagov v celyah utocneniya cunamigennogo potenciala pri obrabotke dannyh sistemy preduprezhdeniya o cunami [Analysis of the wave fields of strong earthquakes and the parameters of their foci in order to clarify the tsunami potential when processing data from the tsunami warning system]: research report (final). FRC UGS RAS. Obninsk, 91 p. (In Russ.).]

гистрации землетрясений начиная с магнитуды $M_{min} = 3.0$. Исключение составляют центральная часть Охотского, северная часть Японского моря, район Средних Курильских островов и приграничная часть Приамурья, где представительной можно считать магнитуду событий $M_{min} = 3.5$. Благодаря более плотной сети сейсмостанций, а также доступу к короткопериодным станциям Хоккайдского университета, на части Южных Курил и территории Сахалинского региона порог уверенной регистрации составляет $M_{min} = 2.5$ [8].

Магнитудные соотношения

Определение магнитуды M_{wa} в качестве энергетической характеристики было введено в практику обработки сейсмологических данных РИОЦ «Южно-Сахалинск» в 2014 г. и первоначально носило эпизодический характер. С 2017 г. число определений M_{wa} постепенно росло, и к концу 2021 г. их количество составило 12 262 для землетрясений с эпицентрами на Дальнем Востоке. M_{wa} определяется для всех землетрясений на эпицентральных расстояниях до 1600 км и для всего диапазона глубин, являясь, таким образом, самой массовой энергетической характеристикой землетрясений в каталоге

Для обработки землетрясений в РИОЦ «Южно-Сахалинск» используется программный комплекс DIMAS [9], процедуры которого позволяют на основе цифровых записей эмулировать сейсмограмму, соответствующую характеристикам сейсмографа Wood-Anderson. При расчете M_{wa} используется максимальное смещение грунта на горизонтальной составляющей с применением функции затухания в соответствии с [5, 6]:

$$M = \lg A_{\max} + 2.56 \lg \Delta - 1.67, \quad (1)$$

где Δ – эпицентральное расстояние в километрах. Рекомендуемый диапазон применения магнитудной шкалы – 10–600 км от эпицентра, однако фактически магнитуда определяется для всех региональных эпицентральных расстояний. Определение магнитуды для глубокофокусных землетрясений, вплоть до событий с глубиной гипоцентра в 600 км, также прак-

тикуется, при этом преимущественно учитываются удаленные станции на эпицентральной дистанции, превышающей глубину. В условиях разреженной региональной сети юга Дальнего Востока России таких станций большинство.

Поскольку магнитуда M_{wa} в практике обработки землетрясений в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН является новой, было проведено исследование границ ее применимости и связи с другими широко используемыми энергетическими характеристиками землетрясений. Результаты готовятся к публикации. В данной работе приведены основные выводы, необходимые для дальнейшего обзора сейсмичности регионов.

Соотношение между магнитудой M_{wa} и энергетическим классом Т.Г. Раутиан K_p , также массово определяемым РИОЦ «Южно-Сахалинск» для землетрясений Сахалина и континентальной части зоны ответственности, было получено методом ортогональной стандартной регрессии (OSR) на основе данных о 310 коровых сахалинских землетрясениях в период наблюдений 2017–2021 гг. (рис. 1 а). Здесь и далее использовались данные о землетрясениях, для которых в определении локальной магнитуды M_{wa} было задействовано не менее 4 сейсмических станций, допуски для коэффициентов регрессионных соотношений приведены для доверительного интервала в 95 %. Формулу предполагается использовать для диапазона магнитуд 1.0–4.5:

$$K_p = 1.54(\pm 0.07) M_{wa} + 4.68(\pm 0.19). \quad (2)$$

По причине малого количества ежегодных определений моментной магнитуды $M_{W(per)}$, получаемой в СФ ФИЦ ЕГС РАН совместно с ИМГиГ ДВО РАН при расчете тензора сейсмического момента центроида региональных землетрясений, регрессионное соотношение $M_{wa}/M_{W(per)}$ пока не получено. Однако удалось оценить связь магнитуды M_{wa} с магнитудой M_W агентства NIED² (Япония) в диапазоне магнитудных значений 3.5–6.0 (рис. 1 б).

Точность определения моментных магнитуд σ_w^2 примерно втрое превосходит точность магнитуд по амплитуде сейсмических волн σ_b^2 , поэтому расчет производился методом

² NIED. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan. URL: <http://www.fnet.bosai.go.jp> (accessed 1.02.2022).

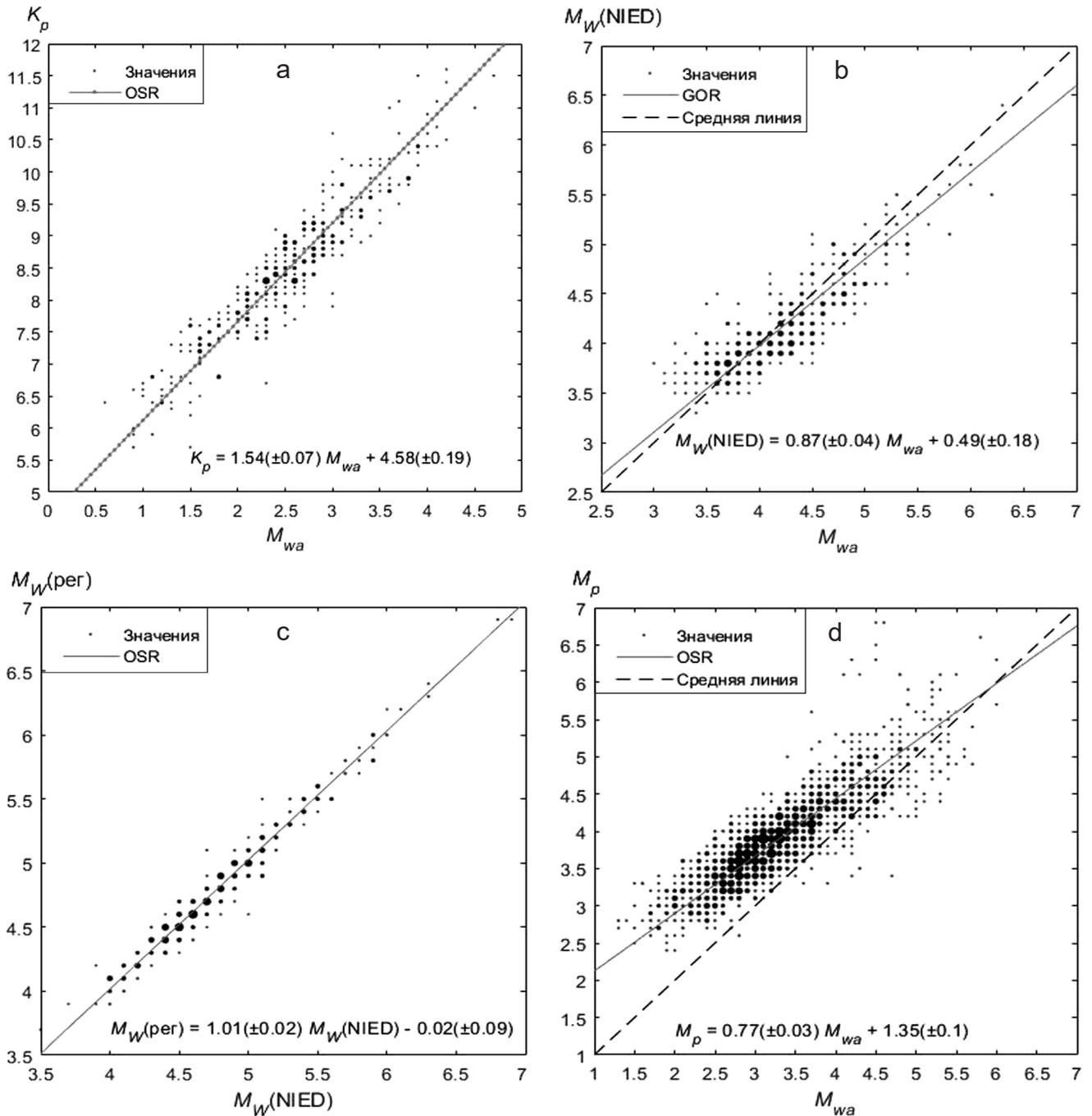


Рис. 1. Регрессионные соотношения между различными энергетическими характеристиками землетрясений, применяемыми в практике обработки землетрясений в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН (по данным 2017–2021 гг.): (а) – между магнитудой M_{wa} и энергетическим классом K_p на основе данных РИОЦ «Южно-Сахалинск»; (б) – между магнитудами M_{wa} РИОЦ «Южно-Сахалинск» и M_W агентства NIED; (с) – между магнитудами $M_{W(per)}$ СФ ФИЦ ЕГС РАН и M_W агентства NIED; (д) – между магнитудами M_{wa} и расчетной M_p СФ ФИЦ ЕГС РАН. Размер точек пропорционален количеству пар значений.

Fig. 1. Regression relationships between various energy characteristics of earthquakes used in the practice of earthquake processing in the SB FRC UGS RAS responsibility zone (according to the data of 2017–2021): (a) – between the magnitude M_{wa} and energy class K_p based on the data of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC; (b) – between the magnitudes M_{wa} by the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC and M_W by the NIED Agency; (c) – between the magnitudes $M_{W(per)}$ by the SB FRC UGS RAS and M_W by the NIED Agency; (d) – between the magnitudes M_{wa} and estimated M_p by the SB FRC UGS RAS. The size of the dots is proportional to the number of paired values.

генеральной ортогональной регрессии (GOR) с отношением дисперсии магнитудных определений $\eta = \sigma_w^2 / \sigma_b^2$ как 1/3. Использовались

472 магнитудные пары всего диапазона региональных глубин. Отдельно получены соотношения для землетрясений глубиной гипоцент-

тра до 60 и свыше 60 км, которые не показали значительных (за пределами доверительного интервала) различий в регрессионных коэффициентах и потому не приводятся. Этот результат подтверждает применимость магнитуды M_{wa} для региональных землетрясений любой глубины.

$$M_{W(NIED)} = 0.87(\pm 0.04) M_{wa} + 0.49(\pm 0.18). \quad (3)$$

Поскольку оценки $M_{W(per)}$ доступны с 2012 г., т.е. за более длительный период, чем для M_{wa} , было проведено ее сопоставление с $M_{W(NIED)}$. Использованы данные о 308 землетрясениях преимущественно южной части Курило-Охотского региона. Как показывает график на рис. 1 с, эти магнитуды практически идентичны, а потому формулу (3) можно применять и для перехода между $M_{W(per)}$ и M_{wa} , по крайней мере внутри магнитудного диапазона $M = 4.0-6.0$.

Ранее в обзорах региональной сейсмичности [1–3] в качестве базовой для описания сейсмичности использовалась магнитуда по поверхностной волне M_{LH} . Как правило, эта магнитуда может быть качественно определена для сильных неглубокофокусных землетрясений, из-за малого количества таких определенных переходное соотношение от нее к магнитуде M_{wa} получить пока не удалось, требуется более длительный период наблюдений. Ранее к магнитуде M_{LH} по переходным формулам [4] приводились более массовые энергетические характеристики, принятые для регионов зоны ответственности СФ. Полученная подобным подходом магнитуда в каталогах ГС РАН получила обозначение – расчетная магнитуда M_p . На рис. 1 d показано соотношение M_{wa} и расчетной магнитуды M_p на основе 1688 магнитудных пар за период 2017–2020 гг. для Курило-Охотского региона.

Очевиден огромный разброс значений, особенно для больших магнитуд, возникающих, вероятно, из-за некорректного применения переходных соотношений между магнитудными шкалами за пределами диапазона их применимости. Именно поэтому в обзоре прошлого года [3] мы заменили для сильных ($M \geq 5.0$ для региона Сахалин и $M > 5.5$ для Курило-Охотского региона) землетрясений

расчетную магнитуду M_p на M_w . Тем не менее большее число данных позволило получить устойчивую зависимость M_{wa}/M_p . Соотношение (4) позволит сохранить определенную преобладание данных с обзорами прошлых лет для диапазона магнитуд 2.0–6.0.

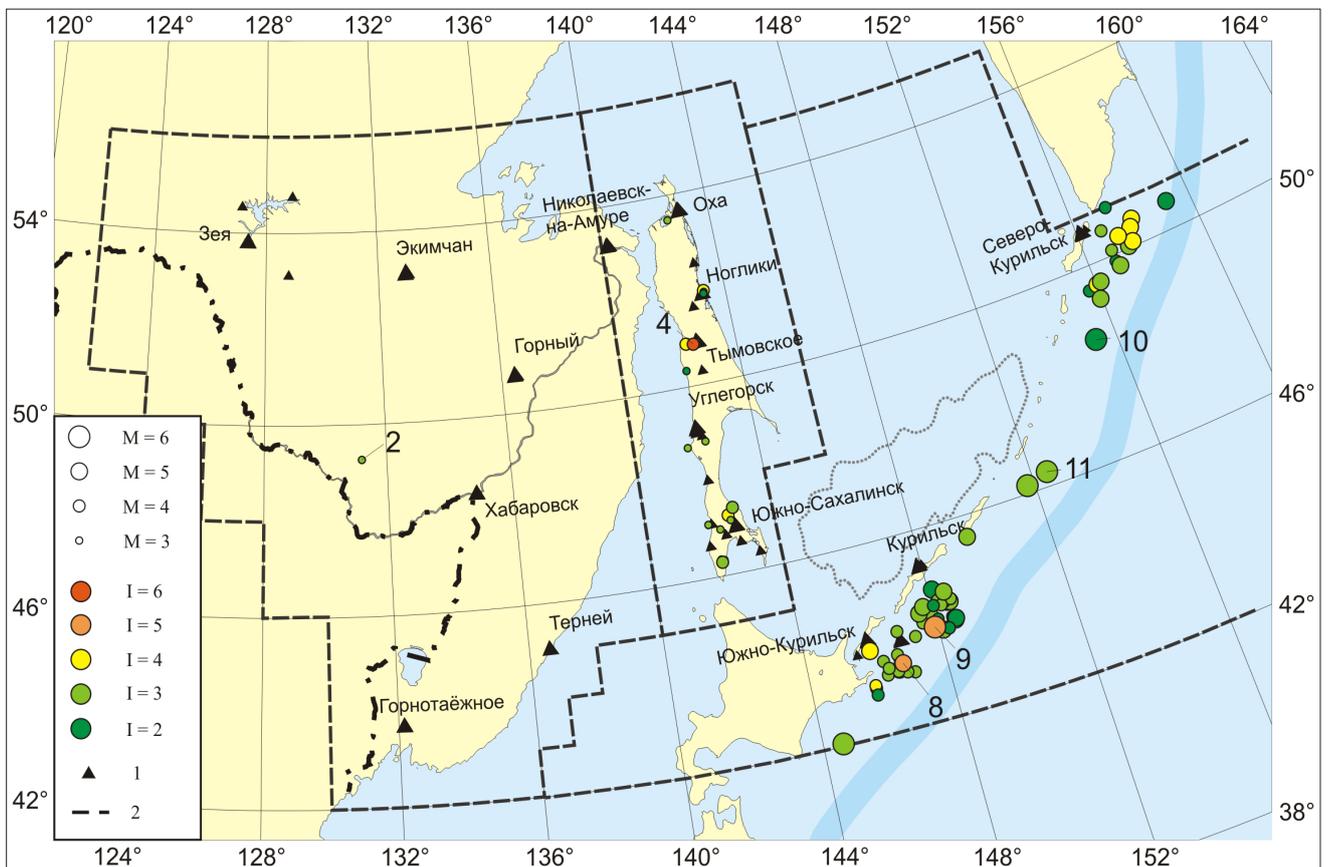
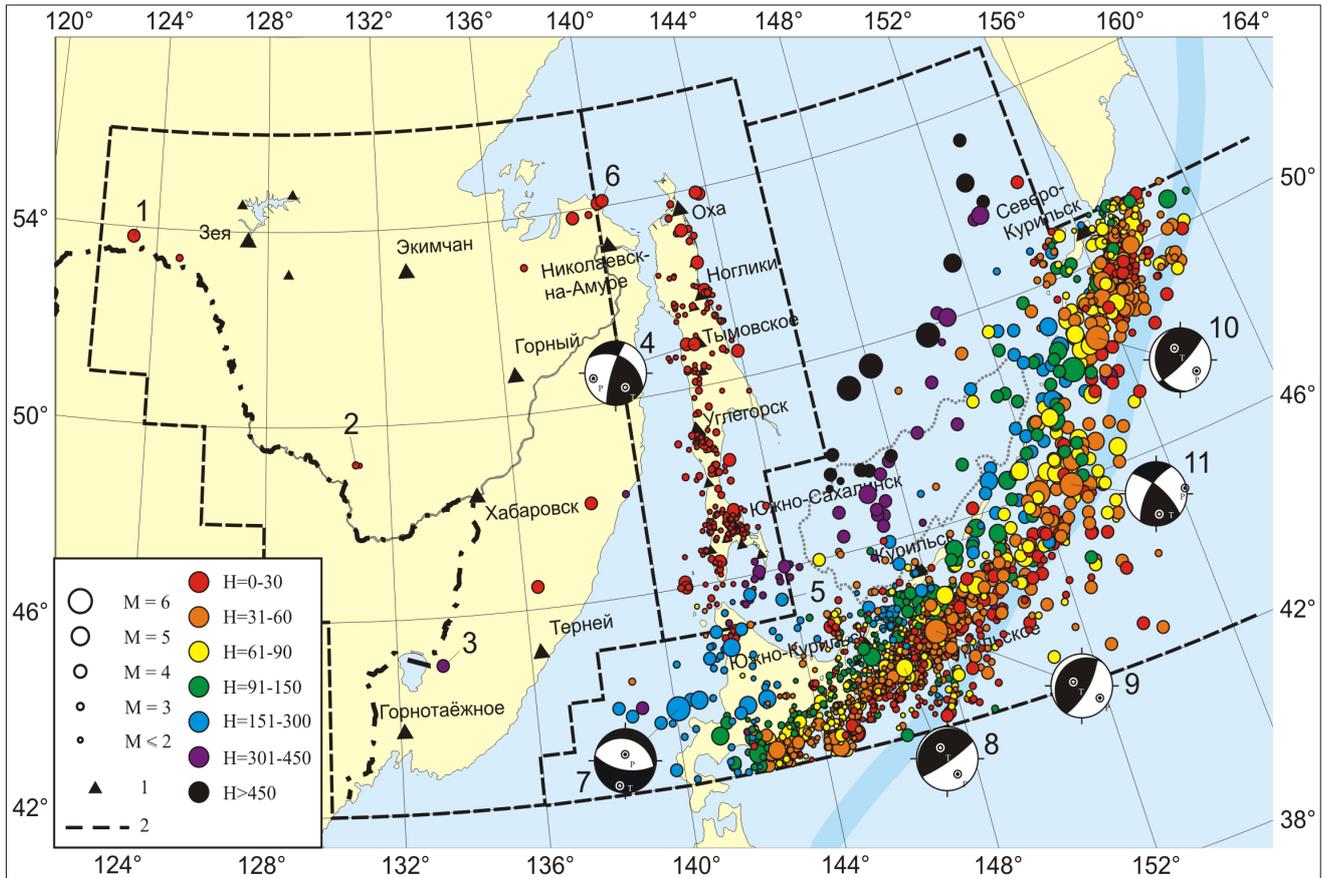
$$M_p = 0.77(\pm 0.03) M_{wa} + 1.35(\pm 0.10). \quad (4)$$

В каталог РИОЦ «Южно-Сахалинск» входят все зарегистрированные землетрясения, включая события, лоцированные по одной станции. Для оперативного анализа сейсмичности подобные землетрясения не использовались. В качестве основной энергетической характеристики принята магнитуда M_{wa} как наиболее массовая. При построении карт (рис. 2, 3) для землетрясений с $M_{wa} > 5.8$ ее значение заменялось на $M_{W(per)}$, поскольку для больших значений магнитуд M_{wa} в пределах рассматриваемой территории все еще недостаточно изучена. Для нескольких землетрясений Сахалинского региона магнитуда M_{wa} в каталоге РИОЦ оказалась не определена, потому была пересчитана с использованием формулы (2) из K_p .

Используемые данные

По данным каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2021 год с учетом описанных выше ограничений в обзор вошло (рис. 2): 2085 землетрясений Курило-Охотского региона, 335 – Сахалинского региона, 12 землетрясений Приамурья и Приморья.

В 2021 г. в Сахалинском филиале в сотрудничестве с ИМГиГ ДВО РАН проведено определение тензоров сейсмического момента центра 40 наиболее сильных землетрясений, включая одно коровое землетрясение на Сахалине. Расчет осуществлялся с использованием программного комплекса ISOLA [10, 11]. Механизмы очагов крупнейших событий, показанных на рис. 2, обсуждаются ниже. На территории юга Дальнего Востока России зарегистрировано 82 ощутимых землетрясения с эпицентрами в пределах изучаемых регионов: 1 – в Приамурье, 23 – в Сахалинском, 58 – в Курило-Охотском регионе. Эпицентры ощутимых землетрясений показаны на рис. 3. Наиболее сильные события также обсуждаются ниже.



Основные характеристики сейсмичности

Для расчета энергии землетрясений в предыдущих обзорах использовалась широко применяемая формула Гуттенберга–Рихтера [6]:

$$\text{Lg } E = 4.8 + 1.5 M_s \text{ (Дж)}, \quad (5)$$

где E – сейсмическая энергия землетрясения, а M_s – магнитуда по поверхностным волнам, в изучаемых регионах ей соответствует M_{LH} .

Для сохранения преемственности с предыдущими работами продолжим использовать данную формулу, переходя от M_{wa} к M_{LH} через соотношение (4). Наиболее существенная часть сейсмической энергии выделяется при самых сильных землетрясениях с $M \geq 5.8$. Для расчета энергии этих событий будет использоваться $M_{W(per)}$. Это не вполне корректно, однако оправданно в связи со значительным разбросом в определении энергетических характеристик сильных событий по объемным и поверхностным волнам. M_{W} , хотя и является производной сейсмического момента, даст более точную и устойчивую оценку изменения суммарной сейсмической энергии, поскольку, как показано в работе [12], магнитуда по поверхностной волне M_s (она же M_{LH}) на интервале магнитуд 6.0–8.0 очень близка к M_{W} .

На рис. 4 показана суммарная ежегодная величина сейсмической энергии изучаемых регионов. Видно, что 2021 год не выделяется на фоне предыдущего десятилетия пиковыми значениями.

Как и в предыдущем обзоре [3], для более формализованного количественного сравне-

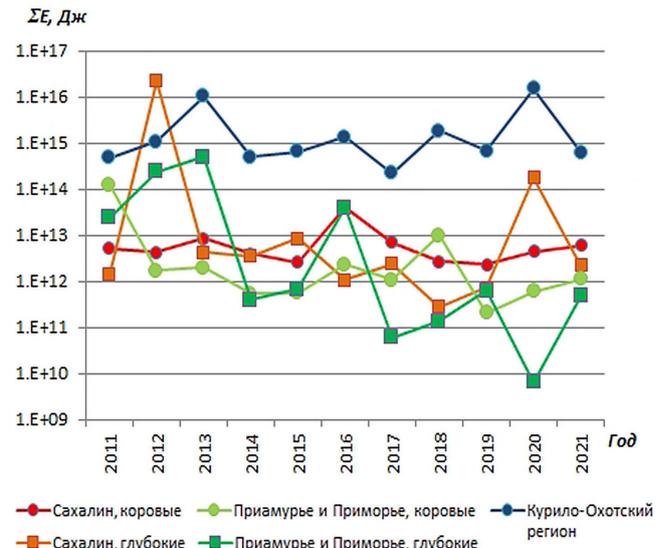


Рис. 4. Суммарная сейсмическая энергия землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2011–2021 гг.

Fig. 4. Total seismic energy of the earthquakes in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2011–2021.

ния сейсмичности регионов по отношению к предыдущим годам были построены функции распределения годовой сейсмической энергии отдельно для глубоких и коровых землетрясений Приамурья и Приморья, Сахалина и совокупной – для Курило-Охотского региона по методике статистической оценки уровня сейсмичности СОУС’09 В.А. Салтыкова [13] (рис. 5, 6). Основой для функции распределения послужили региональные каталоги Приамурья и Приморья 1975–2021 гг., Сахалинского региона 1962–2021, Курило-Охотского региона 1920–2021 гг. [14–16], дополненные данными Сахалинского филиала СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 г. M – магнитуда; H – глубина гипоцентра, км; 1 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН; 2 – границы регионов. Номера эпицентров землетрясений согласно таблице. Приведены механизмы очагов наиболее сильных землетрясений. Пунктирной линией здесь и на рис. 6 показано положение Курильского глубоководного жолоба и Курильской глубоководной котловины.

Fig. 2. Earthquake epicenters map in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2021. M – magnitude; H – hypocenter depth, km; 1 – seismic stations of the SB FRC UGS RAS; 2 – region borders. Numbers of the earthquake epicenters are in accordance with the table. Focal mechanisms of the strongest earthquakes are given. Here and in Fig. 6, the position of the Kuril deep-sea trench and the Kuril deep-sea basin is shown with dotted line.

Рис. 3. Карта эпицентров ощутимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 г. M – магнитуда; I – максимальная интенсивность сотрясений, балл; 1 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН; 2 – границы регионов. Номера эпицентров землетрясений согласно таблице.

Fig. 3. Appreciable earthquake epicenters map in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2021. M – magnitude; I – maximum shaking intensity, point; 1 – seismic stations; 2 – region borders. Numbers of the earthquake epicenters are in accordance with the table.

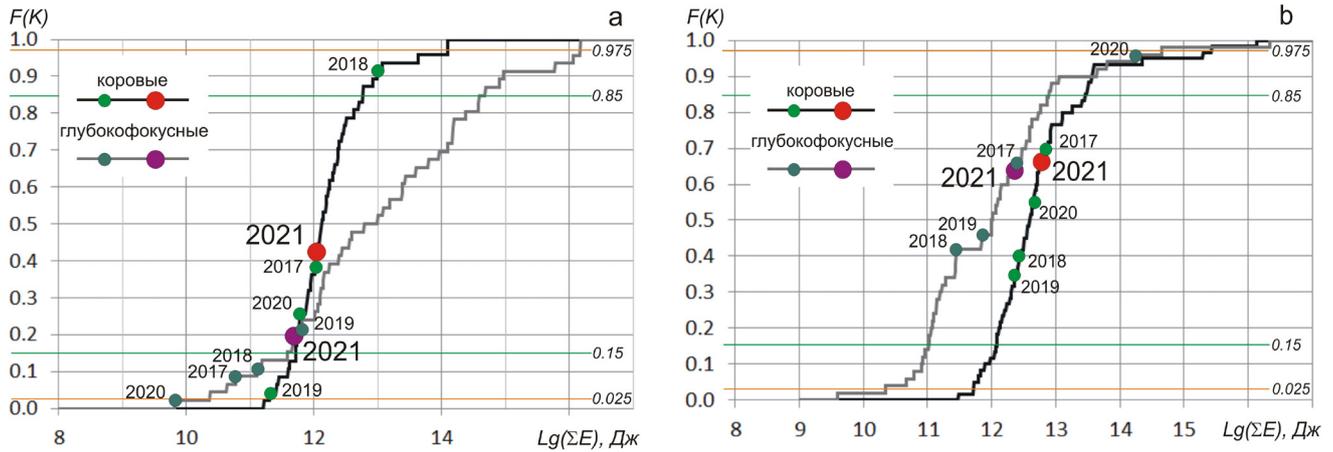


Рис. 5. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии для коровых (черный цвет линии) и мантийных землетрясений региона Приамурье и Приморье (а) и Сахалинского региона (б). Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2017–2021.

Fig. 5. Empirical distribution function of the annual seismic energy for crustal (black line) and mantle earthquakes of the Amur-Primorye region (a) and of the Sakhalin region (b). The points corresponding to each year of the period of 2017–2021 are marked.

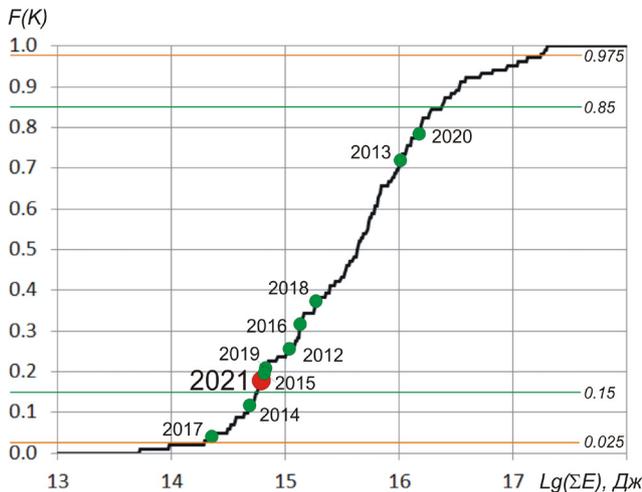


Рис. 6. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии землетрясений Курило-Охотского региона. Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2012–2021.

Fig. 6. Empirical distribution function of the annual seismic energy of earthquakes in the Kuril-Okhotsk region. The points corresponding to each year of the period of 2012–2021 are marked.

В работе (рис. 5, 6) мы придерживаемся предложенной автором [13] методики шкалы уровней сейсмичности:

- экстремально высокий – $K(0.995) < \lg \Sigma E$,
- высокий – $K(0.975) < \lg \Sigma E < K(0.995)$,
- фоновый повышенный – $K(0.85) < \lg \Sigma E < K(0.975)$,
- фоновый средний – $K(0.15) < \lg \Sigma E < K(0.85)$,
- фоновый пониженный – $K(0.025) < \lg \Sigma E < K(0.15)$,
- низкий – $K(0.005) < \lg \Sigma E < K(0.025)$,
- экстремально низкий – $\lg \Sigma E < K(0.005)$.

В регионе Приамурье и Приморье (рис. 5 а) уровень коровой и глубокофокусной сейсмичности 2021 г. можно охарактеризовать как фоновый средний, при этом нужно отметить, что на участке Японской и Курило-Камчатской сейсмофокальных зон под территорией Приморья в последние годы регистрируется очень мало землетрясений как в оперативном каталоге, так и в окончательном, а магнитуда событий находится вблизи уровня регистрационных возможностей сети, поэтому оценка сейсмической энергии весьма приблизительная, но, несомненно, значительно ниже средних значений за последние полвека. В Сахалинском регионе (рис. 5 б) уровень коровой и глубокофокусной сейсмичности также фоновый средний. В Курило-Охотском регионе (рис. 6) уровень сейсмичности находится вблизи границы среднего и пониженного фонового.

Удобным способом проследить динамику сейсмичности на временной шкале является график накопления условной упругой деформации по Беньофу [17]. Использование этого параметра $\Sigma E^{1/2}$ позволяет уменьшить влияние пиковых значений сейсмической энергии наиболее сильных землетрясений, а наклон графика позволяет судить о повышении или понижении уровня фоновой сейсмичности в течение года или более длительного временного периода. Поскольку наиболее сильные события

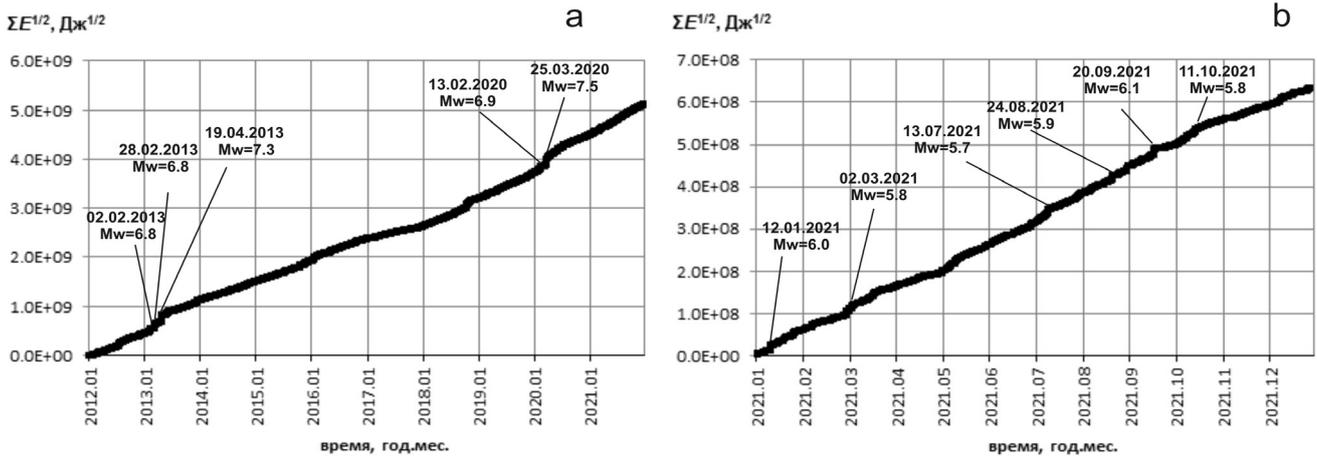


Рис. 7. График Беньофа для Курило-Охотского региона по данным каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2012–2021 гг. (а) и каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2021 г. (б).

Fig. 7. Benioff diagrams for the Kuril-Okhotsk region by the data of the SB FRC UGS RAS catalogs for 2012–2021 (a) and the “Yuzhno-Sakhalinsk” RPC catalog for 2021 (b).

обычно происходят в Курило-Охотском регионе, график Беньофа построен только для этой территории. Как видно из рис. 7, в 2021 г. значительных землетрясений в регионе не отмечено. Едва заметные ступени на рис. 7 б, соответствующие наиболее сильным событиям с магнитудами до $M_w = 6.1$, полностью теряются на графике за десятилетний период (рис. 7 а), а уровень наклона остается примерно постоянным в течение года, сопоставимым с наклоном графика предыдущих спокойных лет.

Условную упругую деформацию по Беньофу можно также использовать для пространственного представления сейсмичности территории. Величина плотности условной упругой деформации рассчитывалась по формуле:

$$\bar{\epsilon} = 1000 \cdot \Sigma E^{1/2} / S, \tag{6}$$

где E – энергия землетрясения, вычисленная по формуле (5), Дж, S – площадь поверхности, содержащей эпицентр землетрясения, км^2 . Условная деформация усреднялась на площадке размером $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ скользящим окном с шагом 0.1° и приводилась к площади в 1000 км^2 . Для сильных ($M \geq 7.5$) землетрясений ее величина перераспределялась на примерную площадь их очаговых зон. При построении изолинии дополнительно сглаживались средствами ПО Surfer. На рис. 8 а показана карта распределения величины $\bar{\epsilon}$ в 2021 г., на рис. 8 б – за предшествующий десятилетний период 2011–2020 г.

Картина распределения параметра $\bar{\epsilon}$ за десятилетний период хорошо соответствует общим представлениям о сейсмичности Курило-Охотского и Сахалинского регионов. Основная полоса максимальных значений плотности условной упругой деформации между Курильской островной дугой и глубоководным желобом соответствует зоне контакта литосферных плит. Параллельно ей под Охотским морем и Хоккайдо намечаются просветы, соответствующие области сейсмического затишья на глубине погружения плиты 200–300 км в юго-западной части, 200–400 км в северо-восточной части зоны субдукции. Далее идет параллельный островной дуге пояс сейсмичности, отождествляемый с фазовыми переходами в субдуцирующей плите на глубинах 350–450 км. Следующий пояс сверхглубокофокусной сейсмичности на глубинах около 600 км на рис. 8 б в основном намечен очагами сильнейших землетрясений 2012 г. ($M_w = 7.7$) [18] и 2013 г. ($M_w = 8.3$) [19], значение параметра $\bar{\epsilon}$ в которых максимально и распределено на область, примерно соответствующую положению очаговых зон этих событий. Более слабые землетрясения на этих глубинах, особенно с эпицентрами в Охотском море, могут пропускаться в связи с низкой регистрационной возможностью сейсмологической сети, потому «пояс» сейсмичности на десятилетнем интервале здесь не образовался. Что касается латерального распределения параметра Беньофа

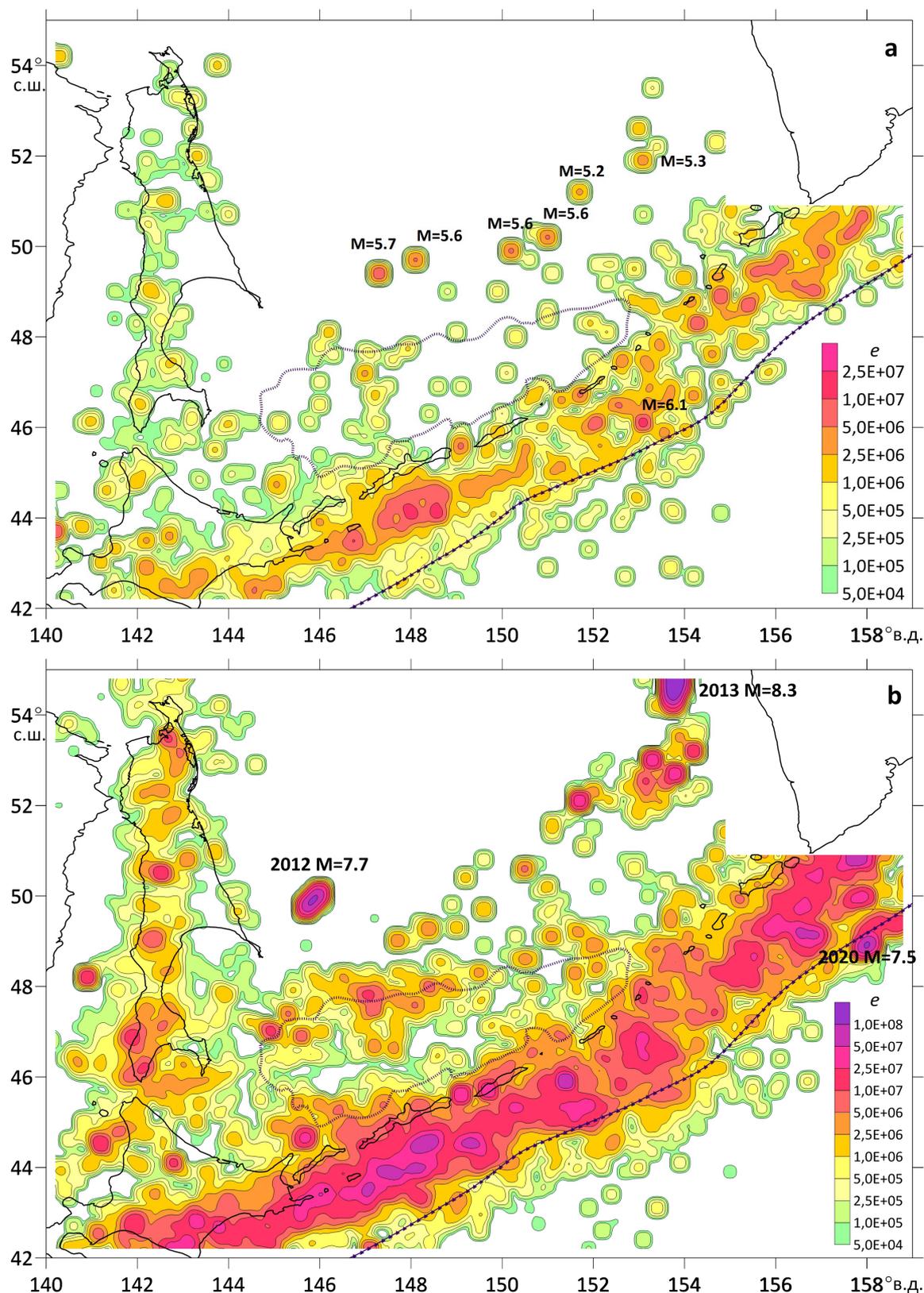


Рис. 8. Плотность условной упругой деформации Сахалинского и Курило-Охотского регионов по данным каталогов РИОЦ «Южно-Сахалинск» 2021 г. (а) и СФ ФИЦ ЕГС РАН 2011–2020 гг. (б). Пунктиром показано положение Курильского глубоководного желоба и Курильской глубоководной котловины.

Fig. 8. Density of conditional elastic deformation of the Sakhalin and Kuril-Okhotsk regions by the data of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC catalog in 2021 (a) and the earthquake catalogs of the SB FRC UGS RAS in 2011–2020 (b). The position of the Kuril deep-sea trench and the Kuril deep-sea basin is shown with dotted line.

вдоль островной дуги, наиболее активны ее фланги, включающие самое сильное коровое событие последнего десятилетия в 2020 г. с $M_w = 7.5$ в районе желоба напротив о. Парамушир. Центральная часть дуги менее сейсмически активна, особенно область, прилегающая к островам Матуа и Шиашкотан, о чем упоминалось на основании карт сейсмической активности A_{10} ранее [2]. В Сахалинском регионе максимумы параметра \bar{e} вытянуты вдоль острова, смещаясь с юго-западного побережья к северо-восточному, что соответствует представлениям о положении границы Охотской и Амурской литосферных плит.

В 2021 г. пиковых значений параметра \bar{e} , сопоставимых с максимумами предыдущего десятилетнего периода (рис. 8), не отмечается. В основном полоса активной сейсмогенерации по-прежнему соответствует положению зоны контакта Тихоокеанской и Охотской литосферных плит. Более активны фланги островной дуги, центр несколько менее активен, однако в 2021 г. отмечен сильным землетрясением 20 сентября $M_w = 6.1$ (см. ниже), параметр $\bar{e} = 1.37 \cdot 10^7$ Дж^{1/2}/км² которого находится ниже максимумов за десятилетний период для этого региона, что является признаком фонового характера произошедшего землетрясения. Области изгиба субдуцирующей плиты под глубоководным желобом и островной дугой в 2021 г. не отмечены значительными очагами сейсмогенерации. Интересен ряд сильных глубокофокусных событий ($H = 415\text{--}605$ км, $M_w = 5.2\text{--}5.7$) с эпицентрами в Охотском море, существенно дополняющих пояса сверхглубокофокусной сейсмичности и частично заполняющих пустое пространство между очагами сильнейших землетрясений 2012 и 2013 годов (рис. 8 а). На Сахалине в 2021 г. поле сейсмогенерации меридионального простирания обособилось в две линии, соответствующие положению Тымь-Поронайского (центральная часть острова) и Хоккайдо-Сахалинского (северо-восточное побережье) разломов.

В таблице приводятся данные из каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» о параметрах наиболее значимых сейсмических событий 2021 г. по магнитуде и произведенному макросейсмическому эффекту.

Обзор сильных землетрясений Приамурья, Приморья, Курило-Охотского и Сахалинского регионов

Сейсмическая активность региона *Приамурье и Приморье* сравнительно невысокая. Параметры большей части землетрясений здесь определяются при окончательной обработке. Как было отмечено [3], в оперативном каталоге СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2020 г. содержится 11 землетрясений с эпицентрами на территории региона, в окончательный каталог 2020 г. вошло 93 землетрясения. В 2021 г. в этом регионе по данным РИОЦ произошло 12 землетрясений.

Наиболее сильное землетрясение с эпицентром в земной коре на территории региона отмечено 14 января в 07:19 UTC ($M_{wa} = 4.1$, $H = 9$ км; № 1 в таблице и на рис. 2) в Сквородинском районе Амурской области южнее очаговой зоны сильного Сквородинского события 2011 г. [20].

Единственное в 2021 г. ощутимое землетрясение на территории Приамурья и Приморья было зарегистрировано 18 января в 12:20 UTC ($M_{wa} = 3.0$, $H = 5$ км; № 2 в таблице и на рис. 2, 3). Эпицентр землетрясения расположен недалеко от г. Облучье Еврейской АО, где отмечались гул и сотрясения оконных стекол, интенсивность сотрясений оценивается в 3 балла.

Из двух глубокофокусных землетрясений в этом регионе наиболее сильное произошло 20 декабря в 09:50 UTC ($M_{wa} = 4.2$, $H = 474$ км, № 3 в таблице и на рис. 2).

По *Сахалинскому региону* в каталоге за 2021 г. содержатся параметры 335 землетрясений, включая 17 мантийных на продолжении Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны (рис. 2). По 23 землетрясениям зарегистрированы данные об ощутимости жителями Сахалинской области.

Самое сильное ощутимое событие произошло 18 апреля в 18:16 UTC ($M_{wa} = 4.4$, $M_w = 4.2$, $H = 6$ км; № 4 в таблице и на рис. 2, 3) вблизи пос. Тымовское, где вызвало сотрясения интенсивностью в 5-6 баллов. В течение 5 дней в очаговой зоне землетрясения было зарегистрировано несколько десятков афтершоков,

пять из которых также вызвали ощутимые сотрясения. Параметры большинства афтершоков фиксировались только одной сейсмостанцией «Тымовское», потому что точность их определения низка, тем не менее, из-за близкого расположения очаговой зоны землетрясения к сейсмостанции, это событие может представлять интерес для изучения афтершоковых последовательностей слабых землетрясений

о. Сахалин. Механизм очага землетрясения (рис. 2) классифицируется как взбросо-сдвиг, событие произошло в условиях субширотного субгоризонтального сжатия, одна из нодальных плоскостей юго-юго-западного простирания субвертикальна, вторая, северо-западного простирания, падает на северо-восток. Землетрясение относится к зоне Тымь-Поронайского (Центрально-Сахалинского) взбросо-надвига.

Таблица. Параметры наиболее значимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН 2021 г. (по оперативным данным РИОЦ «Южно-Сахалинск»)

Table. Parameters of the most significant earthquakes in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2021 (according to the operational data of “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC)

| № п/п | Дата / Date | Время / Time | φ | λ | h, км | M _{wd} M _w | Интенсивность сотрясений / Intensity (населенный пункт, балл / settlement, point) |
|---|----------------|-----------------------------|-------|--------|-------|---------------------------------|--|
| | day. mth. year | t ₀ h:min:sec | | | | | |
| Приамурье и Приморье / Amur-Primorye region | | | | | | | |
| 1 | 14.01.2021 | 07:19:00 | 53.8 | 123.17 | 9 | 4.1 – | Не ощущалось |
| 2 | 18.01.2021 | 12:20:29 | 49.2 | 130.95 | 5 | 3.0 – | г. Облучье, Еврейская АО, 3 |
| 3 | 20.12.2021 | 09:50:21 | 43.51 | 132.67 | 474 | 4.2 – | Не ощущалось |
| Сахалинский регион / Sakhalin region | | | | | | | |
| 4 | 18.04.2021 | 08:16:49 | 50.85 | 142.55 | 6 | 4.4 4.2 | пос. Тымовское, 5-6; Восход, Воскресеновка, Белое, 5; Красная Тымь, 4-5; Подгорное, Кировское, 4; Молодежное, 3-4; Ясное, Зональное, Адо-Тымово, 3; г. Александровск-Сахалинский, 2 (Сахалинская обл.) |
| 5 | 03.06.2021 | 01:43:50 | 45.35 | 143.69 | 293 | 4.4 – | Не ощущалось |
| 6 | 09.06.2021 | 16:20:35 | 54.09 | 140.23 | 5 | 4.5 – | Не ощущалось |
| Курило-Охотский регион / Kuril-Okhotsk region | | | | | | | |
| 7 | 12.01.2021 | 02:39:42 | 43.56 | 140.11 | 216 | 5.9 6.0 | Не ощущалось |
| 8 | 20.02.2021 | 13:23:27 | 43.38 | 146.75 | 64 | 5.1 5.0 | пос. Малокурильское, 4-5; Южно-Курильск, Лагунное, 3; Горячий Пляж, 2-3; Головнино, 2 (Сахалинская обл.); Хоккайдо, 2-3 б. по шкале JMA* |
| 9 | 02.03.2021 | 21:22:44 | 43.93 | 147.91 | 46 | 5.9 5.8 | пос. Малокурильское, 5; Южно-Курильск, Лагунное, Горячий Пляж, Головнино, 4 (Сахалинская обл.); Хоккайдо, 2-3 б. по шкале JMA** |
| 10 | 24.08.2021 | 05:37:51 | 48.54 | 155.34 | 47 | 5.7 5.9 | г. Северо-Курильск, 2 (Сахалинская обл.) |
| 11 | 20.09.2021 | 20:25:23 | 45.92 | 153.03 | 41 | 5.9 6.1 | г. Курильск, пос. Рейдово, 2-3; Южно-Курильск, Малокурильское, Горячие Ключи, 2 (Сахалинская обл.) |

* <https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2021/02/20/2021-02-20-22-23-43.html>

** <https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2021/03/03/2021-03-03-06-23-13.html>

Самое сильное глубокофокусное землетрясение в Сахалинском регионе произошло 3 июня в 01:43 UTC ($M_{wa} = 4.4$, $H = 293$ км; № 5 в таблице и на рис. 2). Эпицентр находится в Охотском море южнее Тонино-Анивского полуострова.

Еще одно умеренно сильное землетрясение, формально относимое к Сахалинскому региону, произошло 9 июня в 16:20 UTC ($M_{wa} = 4.5$, $H = 5$ км; № 6 в таблице и на рис. 2) в Хабаровском крае севернее Николаевска-на-Амуре. Как видно из рис. 2, в этом районе в 2021 г. произошло несколько сопоставимых по магнитуде землетрясений, данных об их ощутимости не зарегистрировано.

К территории *Курило-Охотского региона* в 2021 г. отнесено 2085 землетрясений, ощутимые колебания на территории Сахалинской области вызвали 58 из них.

Крупнейшее по магнитуде землетрясение произошло 20 сентября в 20:25 UTC ($M_w = 6.1$, $M_{wa} = 5.9$, $H = 41$ км; № 11 в таблице и на рис. 2, 3) в центральной части Курильской островной дуги. Сила сотрясений на Южных Курилах достигла 3 баллов. Механизм очага сдвиговый, одна из нодальных плоскостей с правосторонней сдвиговой компонентой простирается в юго-западном направлении вдоль островной дуги, вторая, с левосторонней компонентой сдвига, ориентирована на северо-запад. Гипоцентр расположен в очаговой зоне Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. с $M_w = 8.3$ [21].

Максимальная в 2021 г. интенсивность сотрясений от землетрясений региона была отмечена в результате события 2 марта в 21:22 UTC ($M_w = 5.8$, $M_{wa} = 5.9$, $H = 46$ км; № 9 в таблице и на рис. 2, 3). Эпицентр расположен восточнее о. Шикотан. Интенсивность в 5 баллов была зарегистрирована в пос. Малокурильское, в других населенных пунктах Южных Курил сила сотрясений достигала 4 баллов. Землетрясение произошло в зоне контакта Тихоокеанской и Охотской литосферных плит, механизм очага – пологий надвиг с нодальными плоскостями, ориентированными вдоль островной дуги.

Похожее по сейсмодислокации в очаге и макросейсмическому эффекту событие произошло 20 февраля в 12:23 UTC ($M_w = 5.0$,

$M_{wa} = 5.1$, $H = 64$ км; № 8 в таблице и на рис. 2, 3). Эпицентр южнее о. Шикотан, интенсивность колебаний в пос. Малокурильское составила 4-5 баллов, в других населенных пунктах – до 3 баллов. Механизм очага – также пологий надвиг.

В северной части Курильской гряды наиболее сильное землетрясение произошло 24 августа в 05:37 UTC ($M_w = 5.9$, $M_{wa} = 5.7$, $H = 47$ км; № 10 в таблице и на рис. 2, 3). Гипоцентр также расположен в зоне контакта плит, механизм очага – пологий надвиг с небольшой сдвиговой компонентой, вероятные плоскости разрыва ориентированы вдоль островной дуги. Событие вызвало слабые колебания в г. Северо-Курильск.

Восточнее о. Хоккайдо 12 января в 02:39 UTC ($M_w = 5.0$, $M_{wa} = 5.9$, $H = 216$ км; № 7 в таблице и на рис. 2) произошло самое сильное событие 2021 г. в зоне промежуточных глубин землетрясений. На территории Сахалинской области и Приморья оно не ощущалось. Механизм очага относительно поверхности классифицируется как сброс, обе нодальные плоскости ориентированы субширотно.

Заключение

С 2021 г. в СФ ФИЦ ЕГС РАН оперативный каталог землетрясений юга Дальнего Востока РФ формируется на основе определений РИОЦ «Южно-Сахалинск». Самой массовой энергетической характеристикой каталога РИОЦ является магнитуда M_{wa} , которая при соблюдении ряда условий применения является довольно устойчивой. Получены межмагнитудные регрессионные соотношения, позволяющие связать ее с некоторыми другими энергетическими характеристиками землетрясений регионов. В обзоре сейсмичности 2021 г. M_{wa} взята за основу для каталога землетрясений с магнитудами до $M = 5.8$. Для более сильных событий основной энергетической характеристикой остается моментная магнитуда $M_{w(per)}$.

На основе оперативного каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» получены основные характеристики сейсмичности регионов Дальнего Востока РФ в 2021 г.: оценки уровня сейсмичности СОУС'09; графики Беньофа; карты плотности условной упругой деформации. Для сравнения приведены карты и графики за

предыдущий десятилетний период по данным окончательных каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН.

В 2021 году на территории Приамурья и Приморья, Сахалинского и Курило-Охотского регионов не отмечено увеличения сейсмической активности. Уровень коровой и глубокофокусной сейсмичности характеризуется как фоновый средний.

Наиболее сильные землетрясения относятся к Курило-Камчатской сейсмофокальной области, в основном – к зоне контакта Тихоокеанской и Охотоморской литосферных плит. Более активны фланги островной дуги, однако центр отмечен сильным землетрясением 20 сентября $M_w = 6.1$. Зарегистрирован ряд относительно сильных глубокофокусных событий ($H = 415–605$ км, $M_w = 5.2–5.7$) с эпицентрами в Охотском море между очагами сильнейших землетрясений 2012 ($M_w = 7.7$, $H = 589$ км) и 2013 г. ($M_w = 8.3$, $H = 630$ км).

На Сахалине в 2021 г. поле сейсмогенерации меридионального простирания обособилось в две линии, соответствующие положению Тымь-Поронайского (центральная часть острова) и Хоккайдо-Сахалинского (северо-восточное побережье) разломов. Самое сильное ощутимое землетрясение $M_{wa} = 4.4$ произошло 18 апреля вблизи пос. Тымовское, где оно вызвало сотрясения интенсивностью в 5–6 баллов.

Список литературы

- Сафонов Д.А., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. 2019. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2018 году. *Геосистемы переходных зон*, 3(4): 364–376. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.364-376>
- Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. 2020. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2019 году. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 146–159. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.146-159>
- Сафонов Д.А., Фокина Т.А. 2021. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2020 году. *Геосистемы переходных зон*, 5(4): 308–319. <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.4.308-319>
- Фокина Т.А., Коваленко Н.С., Костылев Д.В., Левин Ю.Н., Лихачева О.Н., Михайлов В.И. 2018. Приамурье и Приморье, Сахалин и Курило-Охотский регион. В ежегоднике: *Землетрясения России в 2016 году*. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 45–53.
- Richter C.F. 1935. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. of the Seismological Society of America*, 25: 1–32.
- Richter C.F. 1958. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
- Kostylev D.V., Boginskaya N.V., Zakupin A.S. 2022. Seismic activity in the focus of the Uglegorsk earthquakes, Sakhalin Island, related to intensive development of coal deposits. *Pure Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02933-6>
- Костылев Д.В. 2021. Формирование единой системы сбора сейсмологической информации в Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН. *Российский сейсмологический журнал*, 3(1): 41–53. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.03>
- Droznin D.V., Droznina S.Ya. 2011. Interactive DIMAS Program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 47(3): 215–224. <https://doi.org/10.3103/S0747923911030054>
- Sokos E., Zahradnik J. 2013. Evaluating centroid moment tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*, 84: 656–665. <https://doi.org/10.1785/0220130002>
- Сафонов Д.А., Коновалов А.В. 2017. Использование программы ISOLA для определения тензора сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов. *Тихоокеанская геология*, 36(3): 102–112.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н. 1990. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки. *Вулканология и сейсмология*, 6: 55–63.
- Салтыков В.А. 2011. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки. *Вулканология и сейсмология*, 2: 53–59.
- Поплавская Л.Н. (ред.) 2006. *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.
- Ким Ч.У., Андреева М.Ю. 2009. *Каталог землетрясений Курило-Камчатского региона (1737–2005 гг.)*. Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 126 с.
- Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Коваленко Н.С. 2019. *Сейсмичность региона Приамурье и Приморье*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 104 с.
- Benioff H. 1951. Earthquakes and rock creep. *Bull. of the Seismological Society of America*, 41(1): 31–62. <https://doi.org/10.1785/bssa0410010031>
- Семенова Е.П., Сафонов Д.А., Фокина Т.А. 2018. Глубокофокусное землетрясение 14 августа 2012 г. с $M_w = 7.7$, $I_0 = 4$ (Охотское море). В ежегоднике: *Землетрясения Северной Евразии*, 21 (2012 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, с. 377–386.
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А., Кравченко Н.М., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Раевская А.А., Салтыков В.А., Чебров Д.В., Ландер А.В. 2013. Глубокое Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. с магнитудой $M_w = 8.3$ – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(21): 17–24.
- Khanchuk A.I., Safonov D.A., Radziminovich Ya.B., Kovalenko N.S., Kononov A.V., Shestakov N.V., Bykov V.G., Serov M.A., Sorokin A.A. 2012. The largest recent earthquake in the Upper Amur Region on October 14, 2011: First results of multidisciplinary study. *Doklady Earth Sciences*, 445(1): 916–919.
- Чеброва А.Ю., Чебров В.Н., Гусев А.А., Ландер А.В., Гусева Е.М., Митюшкина С.В., Раевская А.А. 2015. Воздействие Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. ($M_w = 8.3$) на территории Камчатки и мира. *Вулканология и сейсмология*, 4: 3–22. <https://doi.org/10.7868/S02030306150400333>

References

- Safonov D.A., Fokina T.A., Kovalenko N.S. 2019. Seismicity of the South Far East of Russia in 2018. *Geosistemy*

- perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 364–376. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.364-376>
2. Safonov D.A., Kostylev D.V., Fokina T.A., Kovalenko N.S. **2020**. Seismicity of the South Far East of Russia in 2019. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 146–159. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/grtz.2020.4.2.146-159>
 3. Safonov D.A., Fokina T.A. **2021**. Seismicity of the South Far East of Russia in 2020. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 5(4): 308–319. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/grtz.2021.5.4.308-319>
 4. Fokina T.A., Kovalenko N.S., Kostylev D.V., Levin Yu.N., Likhacheva O.N., Mikhailov V.I. **2018**. Priamurye and Primorye, Sakhalin and Kuril-Okhotsk region. In: *Zemletryaseniya Rossii v 2016 gody [Earthquakes in Russia, 2016]*. Obninsk: FRC UGS RAS, 45–53. (In Russ.).
 5. Richter C.F. **1935**. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. of the Seismological Society of America*, 25: 1–32.
 6. Richter C.F. **1958**. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
 7. Kostylev D.V., Boginskaya N.V., Zakupin A.S. **2022**. Seismic activity in the focus of the Ulegorsk earthquakes, Sakhalin Island, related to intensive development of coal deposits. *Pure Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02933-6>
 8. Kostylev D.V. **2021**. Formation of a unified system for collecting seismological information in the Sakhalin Branch of GS RAS. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal = Russian J. of Seismology*, 3(2): 41–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.03>
 9. Droznin D.V., Droznina S.Ya. **2011**. Interactive DIMAS Program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 47(3): 215–224. <https://doi.org/10.3103/S0747923911030054>
 10. Sokos E., Zahradnik J. **2013**. Evaluating centroid moment tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*, 84: 656–665. <https://doi.org/10.1785/0220130002>
 11. Safonov D.A., Konovalov A.V. **2017**. Moment tensor inversion in the Kuril-Okhotsk and Sakhalin regions using ISOLA software. *Tikhookeanskaya geologiya*, 36(3): 102–112. (In Russ.).
 12. Gusev A.A., Mel'nikova V.N. **1990**. [Relations between magnitudes: global and Kamchatka data]. *Volcanology and Seismology*, 6: 55–63. (In Russ., abstr. in Engl.).
 13. Saltykov V.A. **2011**. A statistical estimate of seismicity level: The method and results of application to Kamchatka. *J. of Volcanology and Seismology*, 5: 123–128. <https://doi.org/10.1134/S0742046311020060>
 14. Poplavskaya L.N. (ed.) **2006**. [Regional catalog of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 103 p. (In Russ.).
 15. Kim Ch.U., Andreeva M.Yu. **2009**. [Earthquake catalog of the Kuril-Kamchatka region (1737–2005)]. Preprint. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 126 p.
 16. Safonov D.A., Nagornyy T.V., Kovalenko N.S. **2019**. *Seismicity of the Amur and Primorye regions*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG FEB RAS, 104 p. (In Russ., abstr. in Engl.).
 17. Benioff H. **1951**. Earthquakes and rock creep. *Bull. of the Seismological Society of America*, 41(1): 31–62. <https://doi.org/10.1785/bssa0410010031>
 18. Semenova E.P., Safonov D.A., Fokina T.A. **2018**. [Deep-focus earthquake of August 14, 2012, Mw = 7.7, Io = 4 (the Sea of Okhotsk)]. In: *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii = Earthquakes in Northern Eurasia*, 21 (2012): 377–386. Obninsk: FITS EGS RAN [FRC UGS RAS]. (In Russ.).
 19. Chebrov V.N., Kugaenko Yu.A., Vikulina S.A., Kravchenko N.M., Matveenko E.A., Mitiushkina S.V., Raevskaya A.A., Saltykov V.A., Chebrov D.V., Lander A.V. **2013**. [Deep earthquake in the Sea of Okhotsk 24.05.2013 with a magnitude Mw = 8.3 – the strongest seismic event near Kamchatka coastline for the period of detailed seismological observations]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(21): 17–24. (In Russ.).
 20. Khanchuk A.I., Safonov D.A., Radziminovich Ya.B., Kovalenko N.S., Konovalov A.V., Shestakov N.V., Bykov V.G., Serov M.A., Sorokin A.A. **2012**. The largest recent earthquake in the Upper Amur Region on October 14, 2011: First results of multidisciplinary study. *Doklady Earth Sciences*, 445(1): 916–919.
 21. Chebrova A.Y., Chebrov V.N., Gusev A.A., Lander A.V., Guseva E.M., Mityushkina S.V., Raevskaya A.A. **2015**. The impacts of the MW 8.3 Sea of Okhotsk earthquake of May 24, 2013 in Kamchatka and worldwide. *J. Volcanology and Seismology*, 9(4): 223–241. <https://doi.org/10.1134/S074204631504003X>

Об авторах

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

Семёнова Елена Петровна (<https://orcid.org/0000-0002-7435-961X>), начальник сейсмической станции «Южно-Сахалинск», Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, semenova@seismo.sakhalin.ru

Поступила в редакцию 30.03.2022
После рецензирования 20.04.2022
Принята к публикации 25.04.2022

About the Authors

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

Semenova, Elena P. (<https://orcid.org/0000-0002-7435-961X>), Chief of Seismic station «Yuzhno-Sakhalinsk», Sakhalin Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, semenova@seismo.sakhalin.ru

Received 30 March 2022
Revised 20 April 2022
Accepted 25 April 2022



Coastal dunes of Urup Island (Kuril Islands, North-Western Pacific): palaeoclimatic and environmental archive

Nadezhda G. Razjigaeva*¹, Larisa A. Ganzey¹, Khikmatulla A. Arslanov²,
Nina F. Pshenichnikova¹

*E-mail: nadyar@tigdvo.ru

¹Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

²St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The Late Holocene phases of aeolian processes have been reconstructed on the basis of dune fields construction. The palaeoenvironmental studies were targeted to following problems: 1) to determine the periods of higher and lower activity of aeolian processes; 2) to establish the age of aeolian deposits and buried soils; 3) to retrace the development of coastal landscapes. The age was determined by radiocarbon dating of paleosols and tephrostratigraphy. The correlation of tephra was performed using data on the volcanic glass chemical composition. The dunes formed during the cooling accompanied by a minor regression. Six buried soils found in the dunes reflect stabilization and overgrowing of dune fields. The longest period of dune stabilization began after a cold event 2800–2600 cal yr BP and lasted until the Little Ice Age. Paleosols contain the tephra of large volcanic eruptions on Urup (Kolokol volcano), Simushir (Zavaritsky volcano) and Iturup (tephra). Pollen analysis allows us to retrace the development of coastal landscapes. Thickets of dwarf pine developed during cooling, birch forests spread in the Medieval Warm Period, and herb meadows were widely represented on the dunes. Human impact on the coastal palaeovegetation was found. Aeolian sedimentation was high during the Little Ice Age. One of the factors of dune reactivation during the Little Ice Age was increased winter storminess associated with the East Asian winter monsoon. Evidence of active cyclogenesis is the increasing proportion of allochthonous pollen. The modern reactivation of aeolian processes is associated with human activity and storm erosion of dunes.

Keywords: aeolian deposits, paleosol, minor regressions, tephra, coastal landscape, human impact

Береговые дюны острова Уруп (Курильские острова, северо-западная Пацифика): архив изменений палеоклимата и природной среды

Н. Г. Разжигаева*¹, Л. А. Ганзей¹, Х. А. Арсланов², Н. Ф. Пшеничникова¹

*E-mail: nadyar@tigdvo.ru

¹Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Реферат. На основе изучения строения дюнных полей восстановлены фазы активизации эоловых процессов в позднем голоцене. Изучение природной среды в прошлом сфокусировано на следующих проблемах: 1) определить периоды активизации и затухания эоловых процессов; 2) выделить возраст генераций эоловых отложений и погребенных почв; 3) проследить развитие береговых ландшафтов. Возраст определялся на основе радиоуглеродного датирования погребенных почв и тephростратиграфии. Корреляция прослоев тephры выполнена с использованием данных по химическому составу вулканического стекла. Дюны формировались при похолоданиях, сопровождавшихся малоамплитудными регрессиями. Шесть погребенных почв, обнаруженных в дюнах, отражают периоды стабилизации и зарастания дюнных полей. Наиболее длительный период стабилизации дюн начался после холодного события 2800–2600 кал. л.н. и продолжался до малого ледникового периода. Палеопочвы включают тephру крупных извержений вулканов на островах Уруп (влк. Колокол), Симушир (влк. Заварицкого – Zav-1) и Итуруп (тефра СКг). Развитие береговых ландшафтов восстановлено на основе данных спорово-пыльцевого анализа. Заросли кедрового стланика на побережье

получали широкое распространение при похолоданиях, березовые леса – в малый оптимум голоцена, на дюнах были развиты разнотравные луга. Установлено влияние древнего человека на развитие палеорасти-тельности. Эоловая седиментация происходила и в малом ледниковом периоде. Одним из факторов активизации эоловых процессов в малый ледниковый период были сильные штормовые ветра, связанные с более интенсивным восточноазиатским зимним муссоном. Увеличение пропорции аллохтонной пыльцы является подтверждением активного циклогенеза. Современная активизация эоловых процессов связана с воздействием человека и размывом дюн в сильные штормы.

Ключевые слова: эоловые отложения, палеопочвы, малоамплитудные регрессии, тефра, береговые ландшафты, воздействие человека

For citation: Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Arslanov Kh.A., Pshenichnikova N.F. Coastal dunes of Urup Island (Kuril Islands, North-Western Pacific): palaeoclimatic and environmental archive. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 100–113. (In Engl., abstr. in Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.100-113>; <https://www.elibrary.ru/afcofs>

Acknowledgements and Funding

The work has been performed with financial support of Russian Science Foundation, project № 21-17-00049 (<https://rscf.ru/project/21-17-00049/>), head E.I. Gordeev. The authors are grateful to N.I. Belyanina who performed the pollen analysis. The expedition was carried out within the framework of the Kuril Biocomplex Project (grant no. NSF ARC-0508109; principal investigator – Ben Fitzhugh). The authors would like to thank all the members of 2008 expedition. Our sincere thanks to Dr Pavel S. Minyuk, Dr Alexander E. Rybalko for their valuable comments.

Introduction

Coastal dunes can be considered a natural archive that reflects the history of coastal development during climatic changes in the Holocene and associated sea level fluctuations. The development of aeolian processes on sea coasts in temperate latitudes results from a combination of several factors, the main ones being a strong wind regime and the presence of rich sources of sand [1–4]. Dune fields, which have been forming for a long time, include several generations corresponding to the phases of aeolian processes activation, and buried soils that correspond to the stabilization of dunes with attenuation of aeolian accumulation and vegetation development. Paleosols provide important information about the development of coastal landscapes. Dunes are widespread on the coast of the Kuril Islands, with particularly large dune fields confined to the shores where sand is abundant: the mouths of large rivers, areas of active sand accumulation and rapid shoreline progradation, areas near active cliffs composed of poorly consolidated rocks or pumice.

The formation of coastal dunes is associated with minor regressions caused by short-term coolings in the Middle-Late Holocene [5–7]. On volcanic islands, aeolian processes develop on the shores near large calderas, where large volumes of loose pyroclastics are pro-

cessed [8]. Some researchers associate the formation of coastal dunes with the intensification of the winter monsoon and the intensity of winter winds [3]. There are especially many dune fields in the south of the Great Kuril Ridge. The dunes of Kunashir and Iturup islands are well studied [5, 6]. The purpose of this article is (1) to determine the periods of activation and attenuation of aeolian processes on Urup Island based on the large dune fields stratigraphy, (2) to determine the age of buried soils and phases of dune stabilization, (3) to find out the relationship with climatic changes and minor sea-level fluctuations, (4) to retrace the development of coastal landscapes in the Late Holocene, (5) to determine the role of volcanic ashfalls in the development of geocomplexes.

Materials and methods

The work was carried out on the dune fields in the Novokuril'skaya Bay (5 sections), the Okhotsk Sea side of northern Urup Island, and the Osma Bay (1 section), Pacific side, southern Urup (Fig. 1). The sections of aeolian deposits with buried soils in the back part of the dune fields are described in detail – section 7508 (46°12.652' N, 150°19.118' E) and 7608 (46°12.640' N, 150°19.146' E). In the Novokuril'skaya Bay, we also described the section 8108 (46°12.649' N, 150°19.221' E) of the aeolian cover on the soil-

pyroclastic unit on a high marine terrace (at an altitude of 38–40 m a.s.l.). The paleosols were sampled for pollen analyses at 5 cm intervals; besides, samples were taken from tephra layers. The genetic horizons in the soil profiles were distinguished based on the classification of the volcanic soils of Kamchatka [9] adapted to the classification and diagnostics of soils in Russia [10].

Sand grain size (7 samples) was studied using sieves with γ step and a high-precision Sartorius balance. Samples for pollen analysis (22 samples) were processed by the separation method using a heavy liquid $H_2O:CdI_2:KI$ (2.2 g/cm^3) [11]. Radiocarbon dating (5 samples) was performed in the Institute of Earth Sciences, St. Petersburg

State University (Table 1). The samples were pretreated with acid and alkali solutions and then converted to benzole. The ^{14}C -activity of benzole was measured using liquid scintillation counter. The radiocarbon dates were calibrated using OxCal 4.4.1 software and IntCal20 calibration curve [12, 13]. The chemical composition of volcanic glass (5 samples) was analyzed using scanning electron microscopy and micro-analysis by X-ray spectrometry, performed by X-ray spectral microanalysis (EPMA) on a (SEM) MIRA3 FE (TESCAN) using Aztec system (Oxford Inst., UK) at V.G. Khlopin Radium Institute, St. Petersburg. Vegetation on the Novokurilskaya Bay coast was described in detail by N.S. Liksakova with coauthors [14].

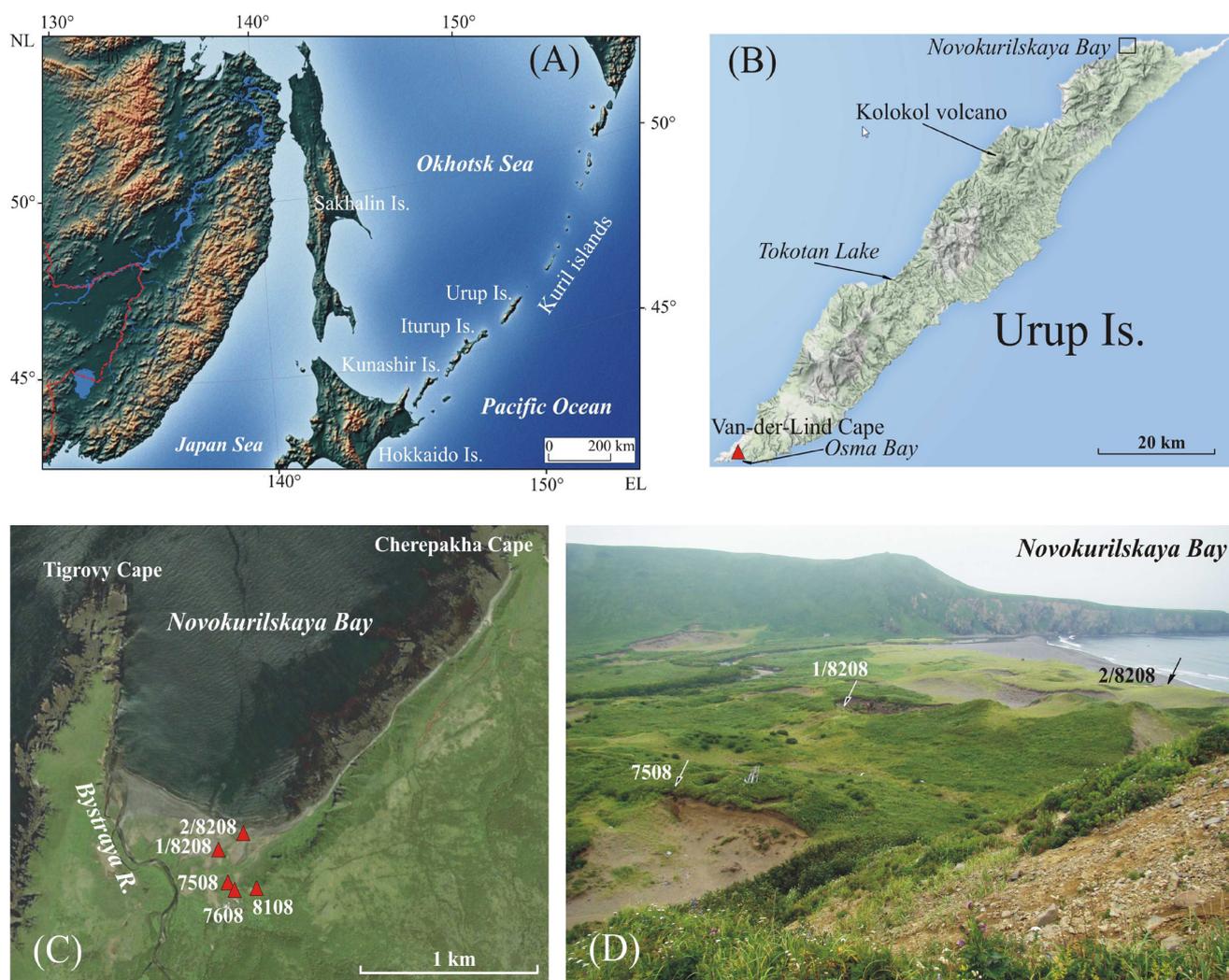


Fig. 1. Location of dune fields of Urup Island. (A) – position of Urup Island in North-Western Pacific region; B – Urup Island with position of study area; C – the Novokurilskaya Bay with dune field and position of studied sections; D – studied dune field with position of key section (7508).

Table 1. Radiocarbon dates obtained for paleosols from the Holocene dune sections, the Novokurilskaya Bay, Urup Island

| Sample number | Depth, m | Material dated | ¹⁴ C-age, BP | Calibrated age (2σ) | Laboratory index |
|---------------|-----------|----------------|-------------------------|---------------------|------------------|
| 1/7508 | 0.89–0.94 | Soil | 910 ± 60 | 820 ± 60 | LU-6106 |
| 2/7508 | 1.18–1.23 | Soil | 2490 ± 70 | 2560 ± 110 | LU-6106 |
| 1/8108 | 1.14–1.17 | Charcoal | 2590 ± 70 | 2660 ± 110 | LU-6107 |
| 2/8108 | 1.30–1.34 | Soil | 3230 ± 120 | 3460 ± 150 | LU-6109 |
| 3/8108 | 4.88–4.93 | Soil | 8170 ± 390 | 9130 ± 480 | LU-6110 |

Results

Unlike Iturup and Kunashir islands, distribution of coastal dunes on Urup Island is limited due to prevailing abrasion and abrasion-denudation coasts with boulder-pebble beaches, a low-order river network with coarse alluvium, and a deficit of sandy material in the coastal zone. An extensive dune field is located in the Novokurilskaya Bay in the northwest of Urup Island (Fig. 1, 2). The semi-open type bay is open to northerly winds. The inshore zone is shallow, with a wide bench (up to 240 m wide) stretching along the cliff in the eastern part. The coast here is belong to abrasion-denudation type, the beach is composed of blocks and boulders. The Bystraya River (IV order) flows into the bay top, the mouth is pressed against the western side.

There is a sandy beach here (width from 30 to 180 m near the river mouth), with a dune field behind (up to 350 m wide), the dune height is up to 12 m. Beach sand is characterized by single-modal curve (0.315–0.4 mm), medium sand fractions prevail (78.7 %), contain high content of coarse sand (up to 20.1 %) and an admixture of fine sand (1.3 %) (Fig. 3 A). From the sea side, erosion scarps are observed in the foredunes. Composition of modern aeolian sand, that accumulated near the escarp base, is similar to beach sand. The grain-size curves are single-modal (mode 0.315–0.4 mm), proportion of fine sand fractions become higher (6.3 %), gravel appears (0.5 %) (Fig. 3 B). Several deep modern deflation basins (up to 6 m deep) with erosion scarps are located on the seaward part; human activity (removal of sand, etc.) could have stimulated their formation (Fig. 1). Aeolian deflation is active along the site of

sand excavation. At deflation basin bottoms, surface of a low marine terrace composed of sandy-pebble material is exposed. There are no regular ridges, perhaps due to active destruction, separate large dunes stand out, which are the remnants of ridges separated by vegetated deflation basins. Modern dunes are composed of well sorted medium-grained sands (mode 0.315–0.4 mm), compared to the beach content of coarse sand fraction decreases (5.7 %), fine sand fraction reaches 12.3 %, and silt appears (<0.1 %) (Fig. 3 C). The surface of the dunes near the sea is covered with monodominant communities of *Carex macrocephala* or *C. pumila* (160 m), vegetated dune ridges in the rear are covered with forb meadows and thickets of *Rosa rugosa* [14]. On the high marine terrace, aeolian deposits are represented by sandy loams with numerous layers of pumice and volcanic ashes.

The dunes located in the seaward part of the field do not have buried soils. The dunes in the rear include up to 6 buried soil profiles. The sections contain 5 tephra interlayers, which correlate well with the tephra layers of the soil-pyroclastic cover on the western side of the bay [15]. In the lower part of the dune section, a pumice layer (pumice size up to 1.5 cm) is exposed in yellow fine-grained sand. Tephra consists of medium-K rhyolite glass (Table 2). It is assumed that this is the tephra of Kolokol volcano, which erupted in the middle of the Late Holocene. The volcanic ash lying above is composed of yellow silt with fine sand. The volcanic glass is rhyolitic with medium proportion of K₂O. The ¹⁴C date of 2490 ± 70 yr BP, 2560 ± 110 cal yr BP, LU-6106 was obtained from the soil under the tephra. This volcanic ash is comparable to the CKr tephra, which is widespread

on Urup Island and the Middle Kuriles [15–17], the source was located in the north of Iturup Island. In the south of Urup Island (Fig. 2) ¹⁴C dates of 2280 ± 90 yr BP, 2300 ± 140 cal yr BP, LU-5947; 2140 ± 110 yr BP, 2130 ± 140 cal yr BP, LU-6257 were obtained from the

peat under the ash located on the Osma Bay coast and the peat bog section located on the Van-der-Lind Cape [18]. Above, there is a volcanic ash interlayer composed of coarse pumice sand with pumice (up to 1 cm) with medium-K rhyolitic volcanic glass, which is Kolokol volcano tephra.

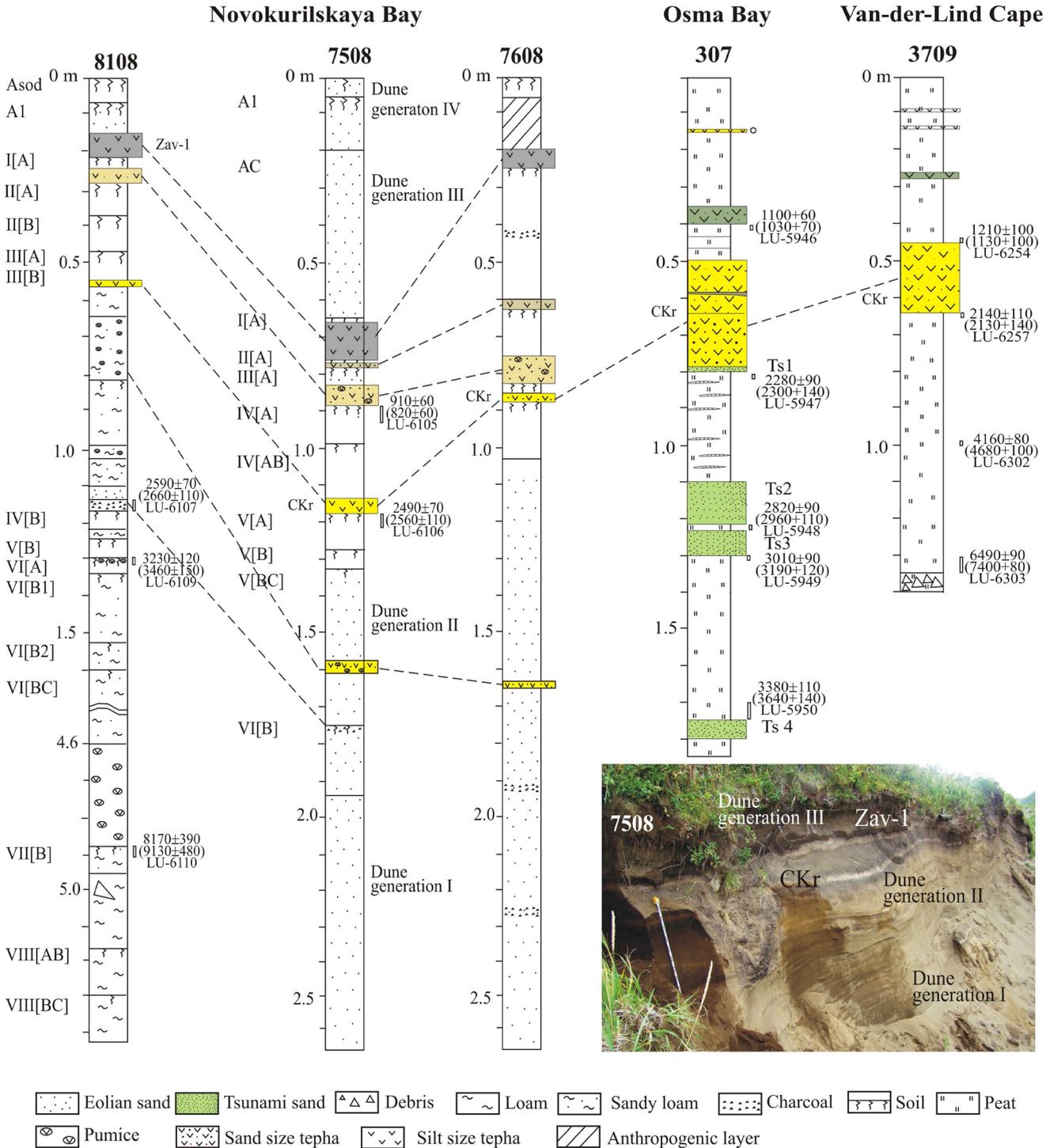


Fig. 2. Lithological columns of aeolian-soil sequences with soil genetic horizons, photo of key section (7508) and sections of peat bogs with tephra layers [18], Urup Island. CKr – marker tephra, Ts – paleotsunami events. We showed the color of tephra.

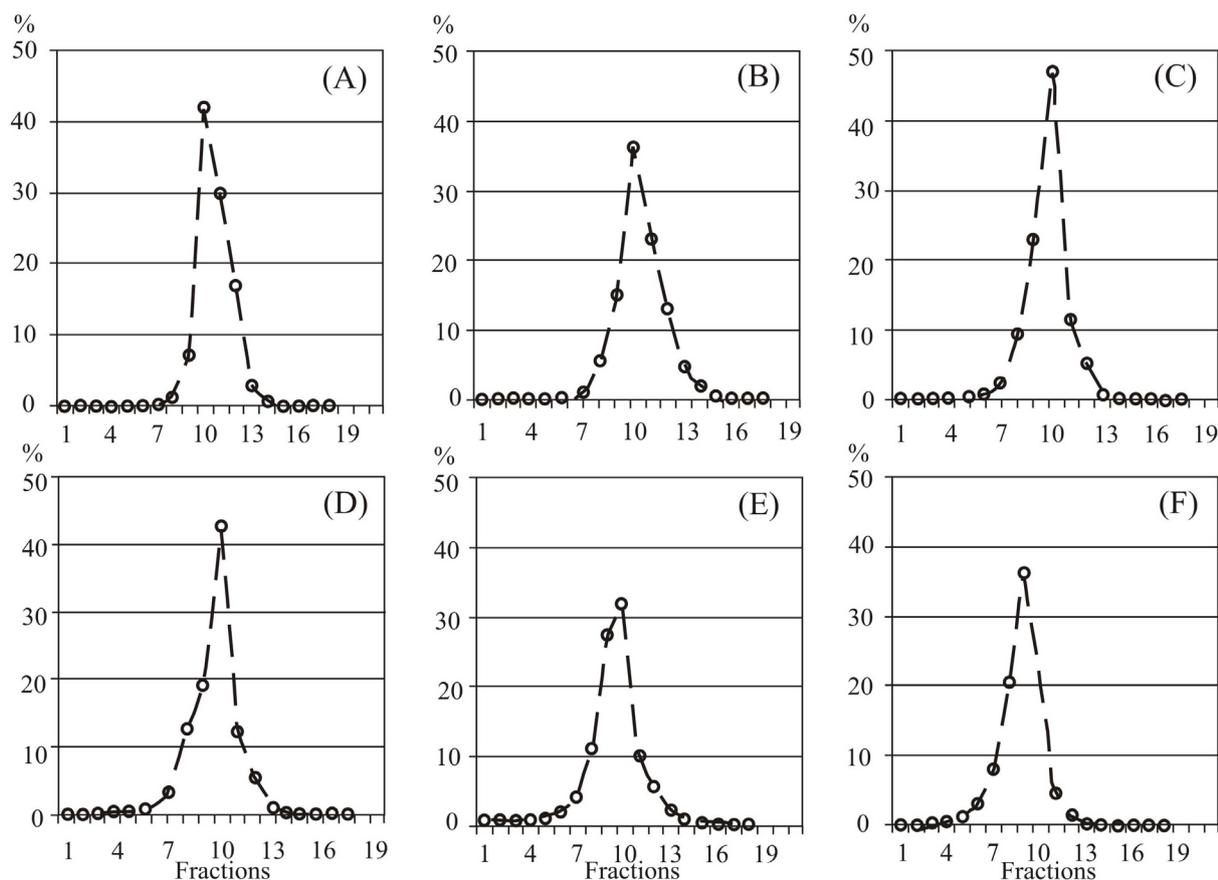


Fig. 3. The grain-size curves of beach and dune sands of the Novokurilskaya Bay.

Fractions (in mm): 1 – <0.05; 2 – 0.05–0.063; 3 – 0.063–0.08; 4 – 0.08–0.1; 5 – 0.1–0.125; 6 – 0.125–0.16; 7 – 0.16–0.2; 8 – 0.2–0.25; 9 – 0.25–0.315; 10 – 0.315–0.4; 11 – 0.4–0.5; 12 – 0.5–0.63; 13 – 0.63–0.8; 14 – 0.8–1; 15 – 1–1.25; 16 – 1.25–1.6; 17 – 1.6–2; 18 – 2–3; 19 – 3–4. (A) – beach; (B) – modern aeolian sand, accumulated near escarp in foredune, site 2/8208; (C) – modern dune near large deflation basin, site 1/8208; (D) – aeolian sand of generation II, section 7508; (E) – aeolian sand of the Little Ice Age, generation III, section 7508; (F) – modern aeolian sand from the top of the dune located in back part of the dune fields, generation IV, section 7508.

The soil under the ash was dated by radiocarbon at 910 ± 60 yr BP, 820 ± 60 cal yr BP, LU-6105. The source of the thin layer of tephra composed of silt with fine sand has not been identified. The upper layer of volcanic ash, represented by green-gray silt, including andesite low-K volcanic glass, is the Zav-1 tephra of the last major eruption of Zavaritsky volcano [15]. On Simushir Island, this eruption age is estimated as ca. 600 ± 50 yr BP, 610 ± 40 cal yr BP, LU-6111; 660 ± 50 yr BP, 630 ± 50 cal yr BP, LU-5912 [17].

In the lower part of the section, on a thick unit of aeolian sands (generation I), only soil horizon VI[B] with small charcoal inclusions has been preserved. Paleosol horizon VI[A] may have burned out. Pollen spectra (pollen zone 1), obtained from the sand lying immediately under the buried soil, have approximately equal

proportions of tree and shrub pollen (AP), grass pollen (NAP), and spores, which correlates well with the widespread development of dwarf pine with a fern cover in the dune framing (Fig. 4). Open birch forests occupied a limited area on the slopes. Alder grew along the valley. On the dunes, forb meadows with abundant Asteraceae, Apiaceae, Caryophyllaceae, *Geranium* were developed. In the section of aeolian sandy loam on the surface of the high marine terrace, a charcoal layer was found, from which the ^{14}C -date 2590 ± 70 yr BP, 2660 ± 110 cal yr BP, LU-6107 was obtained. These may be the traces of a large fire that engulfed the bay coast with the dune field and the surrounding slopes.

Aeolian sand in the middle part of the section was formed during a short-term phase of aeolian processes activation (generation II). The grain-

size curves are similar to sand of generation I (Fig. 3 D). Proportion of medium sand fractions reaches to 74.4 %, but dune sand contains more fine sand (up to 17.5 %). Kolokol volcano eruption producing loose material occurred during this phase, possibly stimulating the development of aeolian processes, especially on high surfaces. On the dunes and on the sea terrace, forb meadows were developed with a wide participation of ferns (pollen zone 2), mainly *Botrychium lunaria*, *B. robustum*, common for forb meadows and shrub communities [14, 19]. The wide development of Asteraceae and the ferns among the pioneer vegetation was noted on Simushir Island [17]. Spores of *Lycopodium* and *Hupersia* appeared. *Duschekia* pollen began to occur.

Higher in the section, there are a series of paleosols V–II buried by tephra layers and paleosols I[A] overlain by aeolian sand. A well-preserved complete paleosol profile V underlies the CKr volcanic ash. The pollen spectra (pollen zone 2) include a large amount of AP, represented mainly by dwarf pine (*Pinus pumila*), which probably grew on the dunes. In horizon V[A], the proportion of AP decreased sharply, and the content of *Botrychium* spores increased.

Well-developed paleosol profile IV was formed after the fallout of CKr tephra. On the dune field, motley grass meadows with ferns and club mosses (pollen zone 3) were widely developed. The dwarf pine was probably being suppressed, since it was constantly used by ancient people. The clearings were likely overgrown with club moss *Lycopodium clavatum*, characteristic of such habitats [19]. The species is also included in forb meadow communities [14].

Allochthonous *Picea* pollen was found, brought in from the south.

Kolokol volcano erupted about 910 ± 60 yr BP, 820 ± 60 cal yr BP, LU-6205. A thin paleosol profile III[A] was formed on tephra. Subsequent volcanic ashfalls led to the burial of both paleosol horizons III and II, which were being formed for only a short period. On the volcanic ash interlayer Zav-1, a thin buried soil I[A] was formed, which was then overlain by aeolian sands (generation III) of the Little Ice Age. The sand is poorly sorted, and contains more gravel (1.2 %) and silt admix (2.9 %) (Fig. 3 E). Pollen spectra from buried soils III–I and tephra interlayers have similar compositions (pollen zone 4). Pollen AP, NAP and spores are represented in equal proportions. The AP group is dominated by birch pollen and dwarf pine. *Duschekia* pollen increased in the upper part of the pollen zone, and *Myrica* pollen appeared. Allochthonous pollen of *Picea*, *Quercus* was found. In the NAP group, a large amount of *Artemisia* pollen was found in the coarse tephra. Just as under modern conditions [14], monodominant communities with sedges (Cyperaceae – up to 53 %) were developed on the dunes. There was a lot of pollen from hygrophilous plants (Ranunculaceae, Iridaceae, Apiaceae), especially in the Zav-1 ash. Club mosses began to dominate among the spores. Single spores of *Sphagnum* and green mosses *Bryales* were found. Paleosols III–I were formed at the Medieval Warm Period.

Pollen zone 5 from the sands of the Little Ice Age and soil A1, reflects widespread development of dwarf pine paralleled with the gradual decrease of birch forests.

Table 2. Chemical composition of volcanic glass from tephra layers of section 7509, the dune field of the Novokurilskaya Bay, Urup Island

| № sample | Depth, m | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | Tephra index or volcano |
|--------------|-----------|------------------|------------------|--------------------------------|------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------|
| 5/7508 (15) | 0.66–0.76 | 63.58 | 0.95 | 15.11 | 8.24 | 0.28 | 1.79 | 5.62 | 3.57 | 0.64 | Zav-1 |
| 7/7508 (4) | 0.77–0.78 | 76.35 | 0.34 | 12.95 | 2.10 | 0.02 | 0.37 | 2.34 | 3.08 | 2.33 | Kolokol |
| 9/7508 (14) | 0.83–0.89 | 76.24 | 0.47 | 12.68 | 2.25 | 0.07 | 0.49 | 2.28 | 3.12 | 2.28 | Kolokol |
| 15/7508 (15) | 1.14–1.18 | 77.86 | 0.36 | 11.81 | 1.86 | 0.04 | 0.29 | 1.69 | 4.13 | 1.70 | CKr |
| 20/7508 (11) | 1.58–1.61 | 77.53 | 0.44 | 12.03 | 1.89 | 0.03 | 0.28 | 1.78 | 3.07 | 2.77 | Kolokol |

Notes. All components are in wt %. Total Fe expressed as FeO. Number of analysis of glass shards in round brackets.

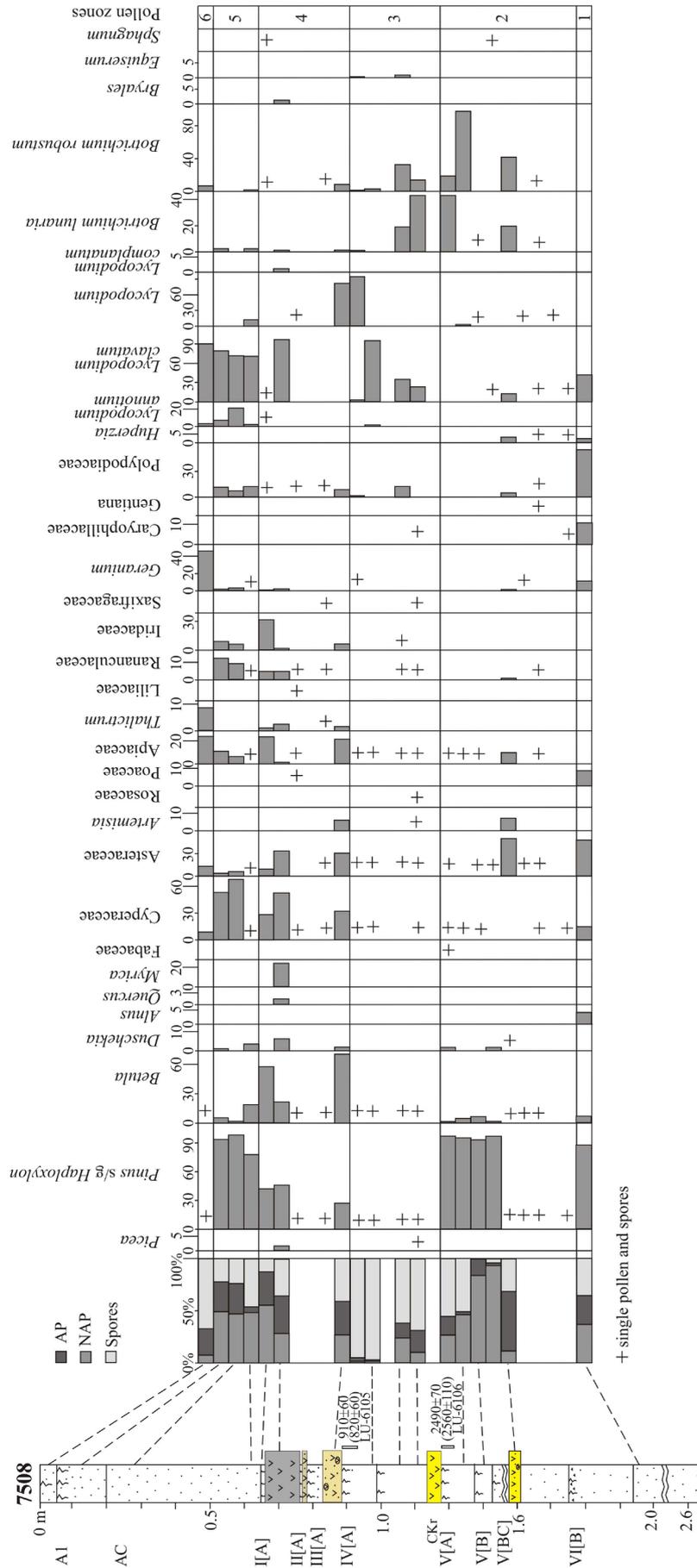


Fig. 4. Pollen percentage diagram of the section 7508, dune field of the Novokuril'skaya Bay, Urup Island.

The dunes were occupied by forb meadows and sedge communities, which were pioneers in new dune ridges. Among the ferns, the Polypodiaceae had become more widely represented. On wetlands and in dwarf pine thickets, the club moss *L. annotinum* was widely developed.

The surface layer of lightly turfed sand (generation IV) reflects modern situation. Proportion of fine sand fractions increase up to 32.8 %. Modal fraction become 0.25–0.315. The sands contain small silt admix (up to 1.3 %) (Fig. 3 F). Spores and NAP prevail in pollen spectra (pollen zone 6). The proportion of moisture-loving plant pollen decreased, and plenty of *Geranium*, *Thalictrum*, and Apiaceae pollen was registered, typical for ancient dune communities with *Rosa rugosa* [14].

The soil-pyroclastic cover with aeolian deposits on the 40 m marine terrace includes 8 paleosols buried by interlayers of tephra and aeolian sandy loams and sands. The most pronounced soil profile is VI with 4 genetic horizons, formed under warm conditions of the beginning of the Late Holocene [18, 20]. From horizon VI[A], the ^{14}C -date was obtained 3230 ± 120 yr BP, 3460 ± 150 cal yr BP, LU-6109. The upper part of the section reveals a series of buried soils III–I, including tephra of Kolokol volcano, CKr and Zav-1.

Discussion

Two phases of intensive accumulation of aeolian deposits are recorded in the studied sections. The age of these phases of aeolian accumulation is estimated by the age of the buried soils (Fig. 2, 3). The first phase combines generations 1 and 2 of aeolian sands, separated by a weakly expressed soil profile with charcoals. The age of generation 1 is estimated by the age of the buried soil VI[A], which lies at the base of aeolian sandy loams on a high marine terrace (^{14}C -date 3230 ± 120 yr BP, 3460 ± 150 cal yr BP, LU-6109) and the overlying charcoal layer (^{14}C -date 2590 ± 70 yr BP, 2660 ± 110 cal yr BP, LU-6107). The upper age limit of generation 2 is estimated by the age of the buried soil V (^{14}C -date 2490 ± 70 yr BP, 2560 ± 110 cal yr BP, LU-6101), topped by CKr ash. Generation 2 of aeolian deposits is well expressed in the section

on the high marine terrace. Buried soils of this age were found in the dune massifs of Kunashir Island, including the Ta-c marker volcanic ash (2400 cal yr BP) of Tarumai volcano, located on Hokkaido [6].

The beginning of the dune field formation in the Novokurilskaya Bay corresponds to one of the global cold episodes of 2800–2600 cal yr BP [21], which manifested itself in the South Kuril Islands and the Japanese Islands. The cool conditions in the northern Urup were evidenced by the widespread dwarf pine and the limited distribution of birch forests. The development of dwarf pine was probably facilitated by heavy snowfalls [22]. On the Tokotan Lake, in the center of Urup (on the coast facing the Okhotsk Sea), temperature decrease was recorded ~ 3090 – 2770 cal yr BP [23]. Cold and dry episodes were revealed in the development of the paleolake in the Osma Bay, southeastern Urup, 3180–2960 cal yr; 2840–2410 cal yr BP [18]. On Iturup Island, a decrease of the Lebedinoye Lake level was noted in 2800–2650 cal yr BP, the areas of broadleaved forests on the coast decreased, and alder thickets began to develop around the lake [24]. In the mountainous part of Iturup, a pronounced cooling occurred about 2870–2570 cal yr BP [25]. In the south of the Okhotsk Sea, the cooling manifested itself about 2800–2400 cal yr BP [26]. The temperature in Japan (Latest Jomon cold stage) decreased by 2 to 3 °C compared to the present, and winter precipitation increased [27, 28]. An increase in the content of allochthonous broad-leaved pollen in the peat bog section in the mountainous part of Iturup Island indicates growing cyclonic activity, and, consequently, points to the activation of the wind regime and strong winds from the sea; the sources of the pollen being the south of the ridge and Japan and the lower landforms [25].

Compared to the transgressive phase in the beginning of the Late Holocene, the sea level decreased about 3000 cal yr BP [20, 29]. During minor regressions an intensive accumulation of material took place in the coastal zone, which led to progradation of coasts and stimulated development of aeolian processes. The sea level drop on the sandy shores led to an increase in beach area and the emergence of additional sources of sand.

The loose material in the Novokuril'skaya Bay is likely to have originated from Kolokol volcano ash fall, the ash being found in the section of dunes and aeolian cover on the high marine terrace (Fig. 2). A connection between the activation of aeolian processes and minor regressions was noted for Iturup and Kunashir islands; large dune fields of generation 2 were formed there [5, 6].

In the southeast of Urup Island, a dune field was formed at this time on the coast of the Osma Bay. A well-defined buried soil with CKr ash is found in the upper part of the dune ridges. Behind the dune field, in the peat bog section, a peat unit with numerous interlayers and lenses of well-sorted aeolian sand is found, which makes it possible to date the aeolian activity phase about 2840–2410 cal yr BP (Fig. 2). The paleolake that existed behind the dune ridge grew shallower and smaller at that time, the climatic conditions became colder and drier [18].

In drier conditions of minor coolings, sandy layers or layers enriched by magnetic minerals, formed by incoming aeolian sand, were found in the coastal lake sediments of the Kuril Islands [30]. On Paramushir Island, the sand layer in the sediments of the Pernatoye Lake was formed 3300–3100 cal yr BP [7]. Paleomagnetic data reflect the activity of aeolian processes for the Tokotan Lake area about 3450–2300 cal yr BP [23]. As shown by the study of the Maloye and Kasatka lakes, aeolian activity also increased in the dune fields of Central Iturup [31].

During the long stabilization phase of the dune field in the Novokuril'skaya Bay, a series of soil profiles V–I were formed, buried by CKr tephra, Kolokol volcano tephra and volcanic ash Zav-1 Zavaritsky volcano and by aeolian sands. The dunes were stabilized due to the development of meadow vegetation and dwarf pine thickets. At this time, dwarf pine was widespread on Simushir Island, south of Urup Island and in the Iturup mountains [17, 18, 25]. The dwarf pine area decreased on the dune field after CKr ash fall, probably owing to the activity of ancient humans who destroyed most of the dwarf pine thickets. In the central part of the dune field, buried soil IV includes numerous artifacts (archaeological site Kompaneiskoye 1), indicating a long-term human

habitation in the dunes [32]. Here, the thickness of the buried soil IV reaches 1.5 m.

The development of soil forming processes was stimulated by climatic conditions, which became slightly warmer and more humid. In the south of Urup Island, slight warming about 2340–2260 years ago is recorded by an increase in the proportion of broadleaf trees in the pollen spectra. About 2340–2250 years ago the paleolake flooded in the Osma Bay [18]. Cool and humid conditions were also recorded on Iturup Island about 2100–2000 cal yr BP and 1900–1200 cal yr BP [24].

In the Novokuril'skaya Bay, soil formation in the dunes continued without interruption during the Kofun cold stage (1600–1300 cal BP), which is distinguished in the south of the Kuriles and the Japanese Islands [5, 20, 27]. On Kunashir and Iturup islands, aeolian processes intensified at this time, and dunes of generation 3 were formed [5, 6]. Activation of aeolian processes is also recorded in the south of Paramushir Island 1700–1300 cal yr BP [7]. Weak development of aeolian processes during this cooling in the north of Urup Island can be attributed to local causes. It is possible that a strong tsunamigenic earthquake that occurred before the CKr ash fall [18] was accompanied by coseismic subsidence. The humid conditions (frequent rains, drizzle) could hinder the development of aeolian processes. Moisture increase is indicated by the appearance of grass pollen, typical of moist habitats. High humidity at that time was recorded in the section of lacustrine deposits of the Lebedinoe Lake on Iturup [24]. During the Kofun cold stage [27], the cold Oyashio Current became more active, which contributed to an increase in rains and fogs in the Southern Kuril Islands [29].

The warmest conditions on the Novokuril'skaya Bay coast were registered in the Medieval Warm Period, when birch forests were widely developed. Birch occupied large areas during the Medieval Warm Period on Simushir Island. The average annual temperature increased only slightly – by tenths of a degree, but the sum of active temperatures could be 150–180 °C higher than the current one [17]. The warm phase is comparable to the European Medieval Climate Anomaly (MCA) and

Nara-Heian-Kamakura warm stage in Japan 1200–700 cal yr BP [27]. This warming affected all Kuril Islands, including Iturup, Kunashir and Lesser Kurils [20, 24, 29, 33, 34].

At the end of the warming, alder became more common in the north of Urup Island, possibly due to frequent ash falls, and *Myrica* appeared in a swamp in a river valley. Sagebrush spread widely in the grassy communities on coarse tephra of Kolokol volcano. On the Zav-1 tephra, composed of silt with low water permeability, the proportion of moisture-loving plant pollen (Cyperaceae, Ranunculaceae, Iridaceae) increased among grass pollens; spores of *Sphagnum* and green mosses *Bryales* appeared. Transport of allochthonous pollen (*Picea*, *Quercus*) from the south became more active. Before the Little Ice Age, oak area could extend to the south of Urup Island [18].

A powerful phase of aeolian accumulation took place in the Little Ice Age. At that time, dune ridges were formed in the seaward part of the field which had no buried soils. In the central part of the dune field, the thickness of aeolian sands reached 1.5–3 m. In the field rear part, aeolian sand (up to 0.45 m thick) overlay buried soil I[A]. Sand accumulation also took place on the high marine terrace. There are dunes of the Little Ice Age in the Osma Bay, the thickness of aeolian sand reaches 2.5–3 m. Many studies have examined dune reactivation during the Little Ice Age. Such dunes are widespread on the Kurile Islands [5, 6, 8] and in Japan [1, 3]. On Iturup Island, aeolian processes were actively progressing on the Vetrovoy Isthmus [8], in Prostor, Kurilskiy, and Kuibyshevskiy bays, on Kunashir Island – the Lovtsovskiy Isthmus, near the Saratovka River, in Golovnina and Perukhin bays, on the Sernovodskiy Isthmus, and in other areas [6]. On the Kuriles, dune fields of this age acquire a maximum thickness in the coastal areas with a gentle underwater coastal slope and extensive benches.

As a rule, dunes of this age have a well-pronounced typical aeolian cross-bedding, emphasized by black layers of heavy minerals, with a wedge-shaped series. Such layering indicates the accumulation of sands due to winds of variable direction. Peaks of magnetic susceptibility and sandy layers formed during the Little Ice

Age were found in lacustrine deposits of central Iturup Island [31].

In the south of the Kuriles (Kunashir Island), the average annual temperature was lower than at present by 2 °C [35], in Japan – by 1 to 2 °C, and atmospheric precipitation increased [27, 36]. The cooling led to widespread distribution of dwarf pine in the north of Urup Island. An increase of dwarf pine as also established for central Iturup [24, 31]. At that time, the areas occupied by broadleaved forests decreased on Iturup and Kunashir islands [20].

The cooling was accompanied by a minor regression, which stimulated the formation of dunes. A sea level drop is evidenced by numerous finds of peat on benches found on the Lesser Kuriles, with layers of volcanic ash Ko-c2 (1694 AD) and Ta-a (1739 AD) at bench bases confirming that the regression began at the end of the 16th century [27]. In the South Kuril Islands, the sea level decreased by at least 1 m. Similar estimates were obtained for the Japanese Islands, where the Edo regression occurred 650–50 cal yr BP [27].

One of the factors of aeolian activation in the Little Ice Age was the increased winds, especially winter winds associated with the intensification of the winter monsoon [3]. Strong winds are evidenced by increased storm activity. For example, the raise in salinity of the Tokotan Lake about 615–500 cal yr BP and ~425–385 cal yr BP is attributed to increased storm activity, which is possibly associated with a change in the monsoon [23]. Strong storm surges were also recorded on the Okhotsk Sea coast of Iturup Island, when marine diatoms were carried along the channels into the Lebedinoe Lake [24]. In the south of the Japanese Islands, typhoons intensified from the mid-17th to the end of the 19th centuries [37]. One of the indicators of the increasing wind drift of pollen is the elevated amount of allochthonous pollen of tree species in the sections of the Northern and Central Kuril peatlands: Ketai, Onekotan, Shiashkotan, and Ekarma islands [16].

Traces of strong storms are observed as large storm bars or accumulative forms at river mouths, which have a height comparable to that of the low marine terraces of the Middle-Late Holocene. The absence of soil cover is typical for

such storm bars, formed in historical time. Modern accumulative forms of the same height (up to 4 m) were found in the Pervukhin Bay, Kunashir Island and the Kuibyshevsky Bay, Iturup Island. The formation of such accumulative forms could occur as a result of strong storm surges.

In modern conditions, the dune field of the Novokurilskaya Bay witnesses a reactivation of aeolian processes due to destruction of soil cover and vegetation, and formation of deflation basins with erosion escarps at sand mining sites. Amounts of sand also come from a wide beach, which receives the material due to erosion of the foredunes during strong storms. The thickets of dwarf pine on the dunes and in the framing of the bay are practically destroyed, there are many open spaces. Activation of aeolian processes is observed on Iturup and Kunashir islands in present-day dune fields, where sandy material is actively removed (Prostor Bay – a dune field near the village of Reidovo; a dune field near the Kuibyshevskoye Lake, the Kuybyshevsky Bay, Iturup; a dune field of the Golovnin Bay near the settlement of Yuzhno-Kurilsk, Kunashir).

Conclusions

Cooling and minor regression are the key drivers of the coastal dune development. In the north of Urup Island, four generations of aeolian deposits have been identified corresponding to the phases of aeolian processes reactivation in the coastal zone in the Late Holocene. Extensive development of aeolian processes took place during cooling with an active wind regime and an abundant sand supply in the coastal zone. The aeolian activity was facilitated by the intensive accumulation of material in the coastal zone during minor regressions. An additional source of loose material was the tephra of large eruptions. The formation of large dune fields on Urup Island is found to be synchronous with that of other dune fields in the South Kuriles. Differences in the stratigraphy of the dune field in the north of Urup compared to other islands are attributed to local causes. The East Asian winter monsoon and increased winter storminess were the main factors of the synchronous dune activity in the Little Ice Age.

A hiatus in dune sedimentation, stabilization of coastal dunes and soil formation as a rule took place during warm episodes. A long period of meadow vegetation and dwarf pine thicket development was identified for the dune field of the Novokurilskaya Bay. Meadow-soddy soils were formed there at the time, with a series of profiles buried by tephra during large volcanic eruptions on Urup (Kolokol volcano) and adjacent islands of Simushir (Zavaritsky volcano) and the north of Iturup.

Human impact played an important role in the development of coastal landscapes. Ancient people who lived among the dunes in the Late Holocene are found to have left traces of their impact on the vegetation. Modern human activities still cause environmental changes in the dune fields. At present, active aeolian processes continue on sand mining sites. Aeolian sedimentation also takes in the material from the wide sandy beach that grows larger due to storm erosion of the dunes.

References

1. Endo K. **1986**. Coastal sand dunes in Japan. *Proc. of the Inst. of Natural Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University, Earth Sciences*, 21: 37–54.
2. Ruz M.-H., Hesp P.A. **2014**. Geomorphology of high-latitude coastal dunes: a review. In: Martini I.P. & Wanless H.R. (eds) *Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences*. London: Geological Society, Spec. Publ., 388: 199–212. <https://doi.org/10.1144/SP388.17>
3. Tamura T., Kodama Y., Bateman M.D., Saitoh Y., Yamaguchi N., Matsumoto D. **2016**. Late Holocene aeolian sedimentation in the Tottori coastal dune field, Japan Sea, affected by the East Asian winter monsoon. *Quaternary International*, 397: 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.062>
4. Vries de S., Arens S.M., Schipper de M.A., Ranasinghe R. **2014**. Aeolian sediment transport on a beach with a varying sediment supply. *Aeolian Research*, 15: 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.08.001>
5. Korotkiy A.M., Razzhigaeva N.G., Mokhova L.M., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Bazarova V.B. **1996**. Coastal dunes as indicator of periods of global climatic deterioration (Kunashiri Island, Kuriles). *Geology of Pacific Ocean*, 13: 73–84.
6. Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A. **2005**. Coastal dune evolution under sea level changes. *Oceanology*, 45(1): 140–149.
7. Minyuk P.S., Subbotnikova T.V., Lozhkin A.V., Anderson P.M. **2013**. Rock magnetic properties of the lake Pernatooe sediments (Paramushir Island) as an indicator of the changes in sedimentation conditions. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 49(1): 120–29. <https://doi.org/10.1134/S1069351313010096>

8. Afanas'yev V.V. **2019**. A new type of aeolian morphogenesis on volcanic shores (Iturup Island, Great Kuril Ridge). *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 423–427. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.423-427>
9. Karpachevskii L.O., Alyabin I.O., Zakharikhina L.V., Makeev A.O., Marechek M.S., Radyukin A.Yu., Shoba S.A., Targul'yan V.O. **2009**. *Soils of Kamchatka*. Moscow: GEOS, 224 p. (In Russ.).
10. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. **2004**. *Classification and Identification of Russia's Soils*. Smolensk: Oikumena, 342 p. (In Russ.).
11. Pokrovskaya I.M. **1966**. Methods of paleopollen studies. In: Pokrovskaya I.M. (ed.) *Paleopalynology*. Leningrad: Nedra, 32–61. (In Russ.).
12. Ramsey B.C. **2021**. OxCal 4.4. 2021. <http://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal> (accessed 12.01.2022).
13. Reimer P. **2020**. Letter from the Guest Editor. *Radiocarbon*, 62(4): V–VII. <http://dx.doi.org/10.1017/RDC.2020.99>
14. Liksakova N.S., Glazkova E.A., Kuzmina E.Yu. **2021**. To the vegetation of Urup Island (the Kuriles). *Botanicheskii J.*, 106 (8): 731–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0006813621080068>
15. Nakagawa M., Ishizuka Y., Hasegawa T., Baba A., Kosugi A. **2008**. Preliminary report on volcanological research of KBP 2007–2008 Cruise by Japanese Volcanology group. In: *KBP Report*. Seattle: Washington University, 54 p.
16. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Belyanina N.I., Mokhova L.M., Arslanov Kh.A., Chernov S.B. **2013**. Holocene climatic changes and vegetation development in the Kuril Islands. *Quaternary International*, 290–291: 126–138. <https://doi.org/10.1016/J.QUAINT.2012.06.034>
17. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Belyanina N.I., Grebennikova T.A., Arslanov Kh.A., Pshenichnikova N.F., Rybin A.V. **2013**. Role climatic and volcanogenic factors in the formation of organogenic sediments and the development of landscape on Simushir Island (Central Kurils) in the Middle-Late Holocene. *Russian J. of Pacific Geology*, 7(3): 199–211. <https://doi.org/10.1134/S1819714013030068>
18. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Belyanina N.I., Ganzei K.S., Kaistrenko V.M., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Rybin A.V. **2019**. Multiproxy record of late Holocene climatic changes and natural hazards from paleolake deposits of Urup Island (Kuril Islands). *J. Asian Earth Sci.*, 181: 103916. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2019.103916>
19. Barkalov V.Yu. **2009**. *Flora of Kuril Islands*. Vladivostok: Dalnauka, 468 p. (In Russ.).
20. Korotky A.M., Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Mokhova L.M., Bazarova V.B., Sulerzhitsky L.D., Lutaenko K.A. **2000**. Middle and late-Holocene environments and vegetation history of Kunashir Island, Kurile Islands, northwestern Pacific. *Holocene*, 10(3): 311–331. <https://doi.org/10.1191/095968300667552216>
21. Wanner H., Solomina O., Grosjean M., Ritz S.P., Jetel M. **2011**. Structure and origin of Holocene cold events. *Quaternary Science Reviews*, 30: 3109–3123. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.07.010>
22. Anderson P.M., Lozhkin A.V., Solomatkina T.B., Brown T.A. **2010**. Paleoclimatic implications of glacial and postglacial refugia for *Pinus pumila* in Western Beringia. *Quaternary Research*, 73: 269–276. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.09.008>
23. Lozhkin A.V., Cherepanova M.V., Anderson P., Minyuk P., Finney B., Pakhomov A., Brown T., Korzun Ju., Tsigankova V. **2020**. Late Holocene history of Tokotan Lake (Kurile Archipelago, Russian Far East): the use of lacustrine records for paleoclimatic reconstructions from geologically dynamic settings. *Quaternary International*, 553: 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.05.023>
24. Nazarova L., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Makarova T.R., Lyashevskaya M.S., Biskaborn B.K., Hoelzmann P., Golovatyuk L.V., Diekmann B. **2022**. The middle to Late Holocene environments on the Iturup Island (Kurils, North Western Pacific). *Quaternary International*, in press. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.05.003>
25. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Degterev A.V., Ezhkin A.K., Rybin A.V., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu. **2022**. The record of environmental changes in lacustrine-swamp sequences within the mountain area of Iturup Island since the Late Glacial Period. *Russian J. of Pacific Geology*, 16(2): 116–130. <https://doi.org/10.1134/S1819714022020087>
26. Kawahata H., Ohshima H., Shimada C., Oba T. **2003**. Terrestrial oceanic environmental change in the southern Okhotsk Sea during the Holocene. *Quaternary International*, 108: 67–76. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00195-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00195-7)
27. Sakaguchi Y. **1983**. Warm and cold stages in the past 7600 years in Japan and their global correlation. *Bull. of the Department of Geography of the University of Tokyo*, 15: 1–31.
28. Yasuda Y. **1995**. Climatic changes and the development of Jomon Culture in Japan. In: Nature and Humankind in the Age of Environmental Crisis, in: Ito Sh., Yasuda Y. (eds.) *Proc. of the VIth International Symp. at the Intern. Research Center for Japanese Studies*, 57–77.
29. Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Mokhova L.M., Bazarova V.B. **2004**. The role of global and local factors in determining the middle to late Holocene environmental history of the South Kurile and Komandor Islands, northwestern Pacific. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 209: 313–333. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.023>
30. Anderson P.M., Minyuk P.S., Lozhkin A.V., Cherepanova M.V., Borkhodoev V., Finney B.A. **2015**. Multiproxy record of Holocene environmental changes from the northern Kuril Islands (Russian Far East). *J. of Paleolimnology*, 54: 379–393. <https://doi.org/10.1007/s10933-015-9858-y>
31. Lozhkin A., Minyuk P., Cherepanova M., Anderson P., Finney B. **2017**. Holocene environments of central Iturup Island, southern Kuril archipelago, Russian Far East. *Quaternary Research*, 88: 23–38. <https://doi.org/10.1017/qua.2017.21>
32. Fitzhugh B., Shubin V.O., Tezuka K., Ishizuka Y., Mandryk C.A.S. **2002**. Archeology in the Kuril Islands: advances in the study of human paleobiogeography and Northwest Pacific Prehistory. *Arctic Anthropology*, 39(1–2): 69–94.
33. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Bazarova V.B., Arslanov Kh.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Belyanina N.I., Lyashevskaya M.S. **2019**. Landscape response to the Medieval Warm Period in the South Russian Far East. *Qua-*

- ternary International*, 519: 215–231. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.12.006>
34. Nazarova L.B., Razjigaeva N.G., Diekmann B., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Belyanina N.I. **2020**. Holocene environmental changes in North-western Pacific (Kamchatka-Kuril Region). *CHIKAI (Nippon Chikeigaku Rengo)/Transactions, Japanese Geomorphological Union*, 41–3: 277–293. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31486.10562>
35. Demezhko D.Yu., Solomina O.N. **2009**. Ground surface temperature change in Kunashir Island Inferred from Borehole Data and Tree-Ring Chronology. *Doklady Earth Sciences*, 426(1): 628–631. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09040266>
36. Kitagawa H., Matsumoto E. **1995**. Climatic implications of $\delta^{13}\text{C}$ variations in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) during the last two millennia. *Geophysical Research Letters*, 22: 2155–2158. <https://doi.org/10.1029/95gl02066>
37. Woodruff J.D., Donnelly J.P., Okusu A. **2009**. Exploring typhoon variability over the mid-to-late Holocene: evidence of extreme coastal flooding from Kamikoshiki, Japan. *Quaternary Science Reviews*, 28: 1774–1785. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.02.005>

About the Authors

Razjigayeva, Nadejda G. (<https://orcid.org/0000-0001-7936-1797>), Doctor of Geography, Principal Researcher, Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, nadyar@tigdvo.ru

Ganzey, Larisa A. (<https://orcid.org/0000-0002-2538-6603>), Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, lganzey@mail.ru

Arslanov, Khikmatulla A. (<https://orcid.org/0000-0002-2302-8175>), Doctor Sci. (Geol. and Miner.), Leading Researcher, Laboratory of palaeogeography and geomorphology of polar countries and the World Ocean, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, Saint Petersburg, arslanovkh@mail.ru

Pshenichnikova, Nina F. (<https://orcid.org/0000-0003-3027-7477>), Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, Laboratory of biogeography and ecology, Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, n.f.p.@mail.ru

Поступила 18.03.2022
После доработки 25.04.2022
Принята к печати 27.04.2022

Received 18 March 2022
Revised 25 April 2022
Accepted 27 April 2022

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



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

УДК 551.465

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.114-123>
<https://www.elibrary.ru/wmvfjq>

Особенности возбуждения сейш в акватории вблизи Поронайска (о. Сахалин)

Д. П. Ковалев*, П. Д. Ковалев, А. С. Борисов, В. С. Зарочинцев, К. В. Кириллов

*E-mail: d.kovalev@imgg.ru

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

Реферат. Представлены результаты изучения возможных источников энергии возбуждения сейш в районе Поронайска (о. Сахалин) с использованием данных натуральных измерений 2008–2009 гг. Временные ряды данных, длительностью около 3 мес., получены с секундной дискретностью двумя автономными регистраторами волнения. Спектральный анализ временных рядов позволил определить, что волновые процессы с периодами от 2 до 7 ч могут быть отнесены к сейшам. С использованием численных методов расчета собственных резонансных колебаний акваторий определены возможные периоды колебаний в зал. Терпения, которые близки к периодам обнаруженных сейш. Вычисленные огибающие волновых процессов показали хорошее совпадение пиков сейш с периодом 7 ч и ветровых волн, что подтверждает передачу энергии от атмосферных возмущений семичасовой сейше. Показано, что период сейш, равный 3.5 ч, совпадает с периодом приливной гармоника $4M_7$. При этом, учитывая высокую для морских акваторий добротность на периоде 3.5 ч, равную 11.9, установлен резонансный путь передачи энергии от приливной гармоника к сейше. Наибольшие высоты сейш на периоде 2.7 ч наблюдаются на 6–8 сутки после максимума суточного прилива с периодом 24.68 ч, который близок к периоду лунной приливной гармоника M_1 . Анализ условий возбуждения сейш с периодом 2 ч показал, что энергия к ним поступает от атмосферных возмущений. При этом увеличение высоты сейш происходит, когда наблюдаются ветра южных румбов в зал. Терпения.

Ключевые слова: сейши, атмосферные возмущения, приливные гармоника, добротность акваторий, спектральная плотность

Features of seiche excitation in the water area near Poronaisk (Sakhalin Island)

Dmitry P. Kovalev*, Peter D. Kovalev, Alexander S. Borisov,
Vitalii S. Zarochintsev, Konstantin V. Kirillov

*E-mail: d.kovalev@imgg.ru

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

Abstract. The results of studying potential sources of seiche excitation energy in the water area near Poronaisk (Sakhalin Island) using natural measurement data in 2008–2009 are presented. Time series data with a duration of about three months were collected by two autonomous sea-level recorders at one-second sample rate. Spectral analyses of time series made possible to conclude that wave processes with periods from 2 to 7 hours can be classified as seiches. Possible seiche periods calculated by numerical methods are very close to the periods of seiches detected in the Terpeniya Bay. The calculated envelopes of wave processes showed a good coincidence of the peaks of seiches with a period of 7 hours and wind waves, which confirms the transfer of energy from atmospheric disturbances to the seven-hour seiche. Seiche period of 3.5 hours is shown to be equal to the period of tidal harmonic $4M_7$. Thus, the resonance pass of energy transmission from tidal harmonic to seiche was revealed taking into account high for marine waters q-factor equal to 11.9 at the period of 3.5 hours. The highest seiches at a period of 2.7 hours are observed on the 6–8 day after maximum of daily tide with a period of 24.68 hours, which is close to the period of lunar tide harmonic M_1 . The analyses of excitation factors of seiches with 2-hour period showed that the excitation energy, or at least a part of it, is provided by atmospheric disturbances. Thus, the increasing of seiche height occurs during the winds of southern directions in the Terpeniya Bay.

Keywords: seiches, atmospheric disturbances, tidal harmonics, q-factor of waterbody, spectral density

Для цитирования: Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Зарочинцев В.С., Кириллов К.В. Особенности возбуждения сейш в акватории вблизи Поронайска (о. Сахалин). *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 2, с. 114–123. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.114-123>; <https://www.elibrary.ru/wmvfjq>

For citation: Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S., Zarochintsev V.S., Kirillov K.V. Features of seiche initiation in the water area near Poronaisk (Sakhalin Island). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 114–123. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.114-123>; <https://www.elibrary.ru/wmvfjq>

Введение

Ранее нами проводились исследования волнового режима в зал. Терпения, в том числе в акватории около Поронайска, по данным натурных наблюдений [1]. В упомянутой работе показано наличие значительных сейшевых колебаний с периодами 2–7 ч. Данные сейши могут представлять проблему при выполнении погрузо-разгрузочных работ в порту Поронайск. В то же время в работе не рассматривались источники энергии возбуждения этих сейш, что могло бы послужить прогнозированию роста высоты этих волн.

Сейши – это стоячие периодические колебания массы воды во всем водоеме или в обособленной его части [2]. Они могут генерироваться под воздействием различных факторов в заливах, бухтах и у открытого побережья. Изучением сейш в разных акваториях занимались многие исследователи [3–6; etc.]. Следует отметить, что периоды сейш зависят от параметров акваторий конкретных побережий, а периоды шельфовых сейш определяются уклоном морского дна. Часто полагают, что периоды сейш находятся в диапазоне от 0.5 до 5 циклов в час [7]. Однако, как показывают наши исследования, такие периоды характерны для небольших по размерам акваторий, а в больших акваториях периоды сейш могут достигать нескольких часов, и это не редкость.

Сейши могут возбуждаться энергией из разных источников. Одни исследователи [6, 8–10] изучают генерацию сейш за счет энергии атмосферных возмущений, которая непосредственно воздействует на поверхность водоема, что характерно для замкнутых акваторий. Сейши в заливах и бухтах генерируются преимущественно через открытую границу, т.е. являются индуцированными [2]. При этом энергия атмосферных возмущений изначально в открытом море передается метеоцунами, а они в свою очередь, приходя в береговую зону или бухту, возбуждают в них сейши.

Другие исследователи, например [5], рассматривают сейши, возбуждаемые энергией из открытого моря, где она может генерироваться более широким рядом механизмов, например приливом, прибоем, цунами, внутренними волнами, а также и атмосферными возмущениями [3, 4, 12, 13]. При этом доминирующий источник может различаться от гавани к гавани в зависимости от наличия таких механизмов и конкретной географической ситуации гавани. Источ-

ников достаточно много, поэтому представляет интерес определить источник энергии сейш с целью возможного их прогнозирования.

Следует еще отметить, что амплитуда сейш определяется не только величиной поступающей энергии, но и параметром резонансной акватории – добротностью. Именно она показывает, насколько могут возрасти амплитуды входящих волн, имеющих периоды, близкие к резонансным периодам самой акватории. Такие сейши могут достигать значительных амплитуд и представлять угрозу для хозяйственной деятельности в прибрежной зоне. Поэтому и необходимо изучение особенностей режима волнения конкретных участков побережья.

Данные наблюдений

В данной работе использованы наблюдения 2008–2009 гг. за волнением в зал. Терпения, в акватории порта Поронайск, которые проводились с помощью автономных регистраторов волнения АРВ-14. Прибор с номером 19 был установлен 21.07.2008 в порту Поронайска на глубине 2.2 м, а прибор с номером 22 установлен 30.06.2009 с противоположной стороны зал. Терпения на глубине 27.8 м. Запись проводилась с дискретностью 1 с. К сожалению, записи температуры содержат много сбоев и поэтому не могут быть использованы для оценки возможности вклада внутренних волн в формирование сейш. Карта района наблюдений и места установки приборов показаны на рис. 1. Полученные временные ряды приведены на рис. 2.

Видно, что временные ряды существенно различаются (рис. 2), и связано это с различным местоположением приборов. Прибор № 19 располагался в порту г. Поронайск, который находится в устье реки, и ветровое волнение и зыбь там значительно ослабляются. На записи же прибора № 22, установленного в открытой акватории зал. Терпения, короткопериодное волнение хорошо видно. Выделяются моменты с высотой волн, достигающей 3 м во время штормов. В то же время длинные волны с периодами от 30 мин не изменяются, о чем можно судить по уровню прилива в разные годы. На временных рядах обоих приборов также хорошо видны суточные и полусуточные приливные колебания уровня моря. Их величина и в порту Поронайска, и в районе расположения прибора № 22 не превышает 1.5 м.

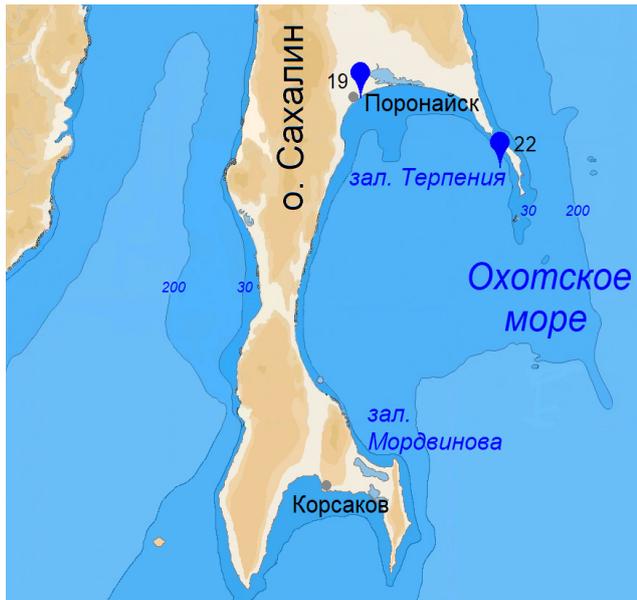


Рис. 1. Район наблюдений и места расположения приборов.

Fig. 1. The observation area with locations of the equipment.

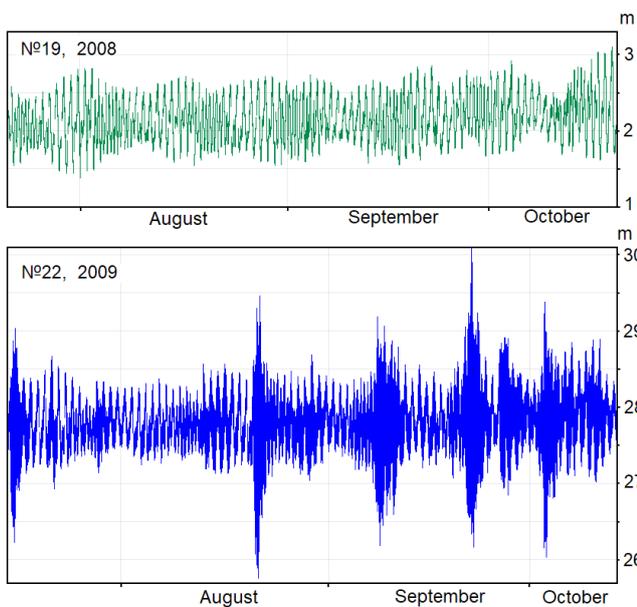


Рис. 2. Временные ряды колебаний уровня моря для двух пунктов наблюдения.

Fig. 2. Time series of sea level oscillations for two observation points.

Анализ временных рядов

Полученные временные ряды были подвергнуты спектральному и взаимно-спектральному анализу с использованием программы Кута [14, 15]. На рис. 3. приведены графики спектральных плотностей колебаний уровня моря для двух пунктов наблюдения, вычисленные по исходным временным рядам и по рядам, из которых вычтен предвычисленный прилив.

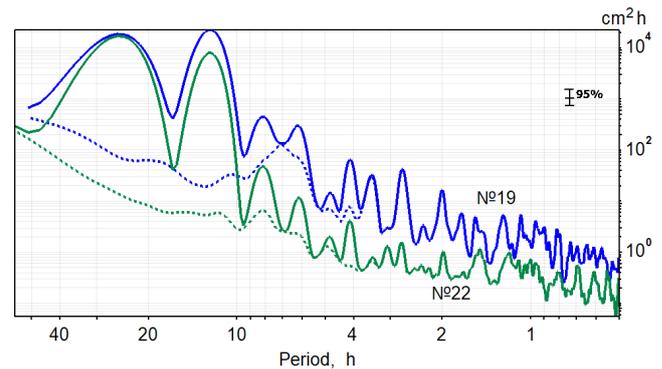


Рис. 3. Спектральные плотности колебаний уровня моря (вертикальная ось), рассчитанные для полученных рядов наблюдений (сплошные линии) и после вычитания предвычисленного прилива (пунктирные линии).

Fig. 3. Spectral densities of sea level oscillations (vertical axis) calculated for obtained original time series (solid lines) and for time series after subtraction of precalculated tide (dotted lines).

Спектральные плотности рассчитаны для диапазона периодов колебаний от 0.5 до 60 ч. Графики (рис. 3) содержат большое число пиков на периодах от 1 до 12 ч. Эти пики могут быть отнесены к приливным гармоникам высших порядков или являться собственными колебаниями акваторий, обладающих резонансными свойствами. Из рис. 3 видно, что на спектральных плотностях временных рядов с вычтенным приливом часть пиков отсутствует. И поскольку предвычисленный прилив рассчитывается программой Кута по большому числу приливных гармоник – 67 [14], то, значит, оставшиеся пики не являются приливными гармониками и определяются сейшми.

Далее будем рассматривать волновые процессы с периодами около 2, 2.7, 3.5 и 7 ч. Средние амплитуды этих волновых процессов определены из спектральных плотностей по формуле [16].

$$\bar{A}^2 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) d\omega, \quad (1)$$

где интегрирование производится по интервалу частот в окрестностях пика, в пределах от 4.1 см для периода 2 ч до 11.1 см для периода 7 ч. Поэтому более короткие сейши, как обладающие существенно меньшей средней амплитудой, например 2.3 см для периода 1.2 ч, рассматривать не будем.

Отметим также, что пик на периоде около 7 ч на спектральной плотности измерений прибора № 19 с не вычтенным приливом скрывается близко расположенными пиками приливных

гармоник, несмотря на то что энергия этих волн достаточно большая. И эти колебания проявляются на записи только для прибора № 19, на № 22 они не обнаруживаются. Возможно, это связано с местом установки прибора № 22 далеко от пучности колебаний на этом периоде. Также колебания с периодом около 7 ч могут быть сейшеобразными, а не сейшей. В этом случае, как считают авторы работы [17], сейшеобразные колебания имели одну узловую линию и прибор № 22 в месте его расположения не регистрировал их.

Для оценки периодов стоячих колебаний уровня в гидрологической практике используют различные методы численного расчета. Наибольшее распространение получили методы Мериана, Дюбуа, Дефанта, Кристалла, Давыдова и Кошечева [18]. Определим возможные периоды собственных колебаний зал. Терпения, учитывая его параметры: длина 65 км, ширина около 130 км, средняя глубина 30 м – и используя формулу Мериана для полуоткрытых прямоугольных бассейнов длины L и однородной глубины H [2, 19]:

$$T_n = \frac{2L}{n\sqrt{gH}} \quad \text{для моды } n = 1, 2, 3, \dots, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения.

При этом для первой моды сейшевых колебаний был получен период 2.1 ч, который близок к обнаруженному периоду пика 2 ч на графике спектральной плотности.

К сожалению, формула (2) не дает представления о типе сейш – продольные или поперечные. Возможно использование метода расчета, предложенного в работе [17], хотя и несколько приближенно, для прямоугольной формы бассейна зал. Терпения. Выражение для расчета сейш имеет вид:

$$T_{km} = \frac{2}{\sqrt{gH}} \frac{ab}{\sqrt{k^2b^2 + m^2a^2}}, \quad (3)$$

где T_{km} – периоды собственных колебаний жидкости, $k = 0, 1, 2, \dots$, $m = 0, 1, 2, \dots$, a , b – геометрические параметры бассейна. Индексы k и m определяют количество узловых линий уровня у каждой моды сейш, которое равно сумме индексов $k + m$. Число узловых линий, параллельных оси y , равно k (продольные сейши), а параллельных оси x , равно m (поперечные сейши).

Выполненный по формуле (3) расчет показал в зал. Терпения, ограниченном снизу широтой мыса Терпения, наличие продольной сейши с периодом около 2 ч, что совпадает с расчетом по формуле Мериана. Кроме того, расчет выявил возможность генерации поперечной сейши с периодом около 4.2 ч. Пик с периодом 4.1 ч присутствует в графике спектральной плотности для измерений прибором № 19, хотя его величина немного превышает 85%-й доверительный интервал, и этот пик хорошо виден на кривой, рассчитанной по ряду с вычтенным приливом. Но энергия и амплитуда этих колебаний малы.

В выполненных выше расчетах использовались формулы с приближением для средней постоянной глубины. Формулы расчета сейш для переменной глубины достаточно сложные. Авторы использовали относительно простую формулу метода Дюбуа [18, 19] для расчета одноузловой сейши водоема переменной глубины. В методе осевая линия делится на n участков длиной Δx и период вычисляется по формуле

$$T = \left(\frac{4}{\sqrt{g}}\right) \sum_{i=0}^{i=h} \Delta x / (\sqrt{H_i} + \sqrt{H_{i+1}}), \quad (4)$$

где H_i и H_{i+1} – глубина воды в точках пересечения осевой линии с перечисленными створами, равномерно распределенными по длине водоема.

Длину зал. Терпения разбили на 6 отрезков длиной по 12 км начиная от южного берега оз. Невского до широты мыса Терпения. Расчет с использованием (4) показал период 2.9 ч. По данным наблюдений, в спектральной плотности присутствует пик с периодом 2.7 ч, т.е. близким к расчетному. Аналогично был проделан расчет для поперечной сейши по широте от Поронайска на восток до пересечения с берегом п-ова Поронайский. Расчет показал период первой моды 3.6 ч при пике в спектральной плотности 3.5 ч, т.е. также близком к расчетному.

В работе [18] сказано, что периоды сейш, вычисленные по приведенным выше формулам, как правило, оказываются весьма близкими к измеренным значениям, что получено и в данной работе. Таким образом, расчеты показали, что в зал. Терпения возможна генерация

сейш на периодах пиков в спектральной плотности колебаний уровня моря. И эти периоды определяются резонансными свойствами акватории зал. Терпения. Некоторые различия между рассчитанными и наблюдаемыми периодами не имеют большого значения. Главным является вывод, что генерация сейш на периодах, полученных из данных наблюдений, возможна и обнаруженные волновые процессы действительно являются сейшами – резонансными колебаниями акватории зал. Терпения.

Анализ возможных источников энергии возбуждения сейш

Рассмотрим возможные источники энергии, которые могут возбудить сейши в зал. Терпения. Выше отмечалось, что сейши могут генерироваться широким рядом механизмов, таких как прилив, прибой, цунами, внутренние волны и атмосферные возмущения. Проведем анализ возможных источников энергии для обнаруженных сейш с периодами 2, 2.7, 3.5 и 7.

Рассмотрим, откуда поступает энергия на возбуждение сейш с периодом 7 ч. Для этого отфильтрован временной ряд колебаний уровня с периодом 7 ч, приведенный на рис. 4 а.

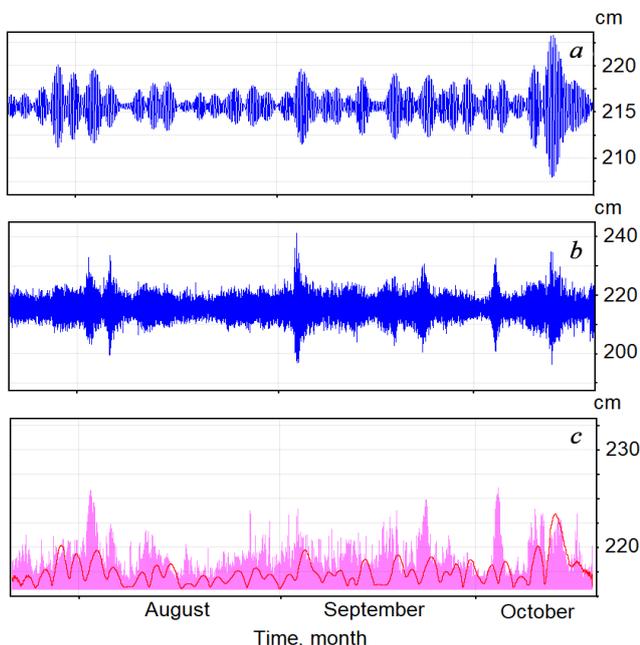


Рис. 4. Временной ряд колебаний уровня моря в 2008 г. с периодом 7 ч (а), временной ряд, содержащий ветровые волны и зыбь (б) и их огибающие (с). Красная кривая для сейш с периодом 7 ч.

Fig. 4. Time series of sea level oscillations in 2008 with a period of 7 hours (a), time series with wind waves and swell (b) and their envelopes (c). Red line is for seiches with a period of 7 hours.

Фильтрация проводилась полосовым фильтром программы Кута в полосе периодов $\pm 5\%$ от периода 7 ч. Далее его сравнили с временными рядами, содержащими прилив, инфрагравитационные волны и колебания уровня, вызываемые ветровым волнением и зыбью (рис. 4 б). Заметим, что последний временной ряд косвенно отображает прохождение вблизи или над районом наблюдений атмосферных возмущений.

Визуальное сравнение временных рядов показало, что максимальные высоты сейш соответствуют максимумам ветрового волнения и зыби. Однако, поскольку периоды волн зыби, ветровых волн и семичасовой сейши существенно различаются, для большей убедительности для рассматриваемых временных рядов были вычислены огибающие этих волновых процессов (рис. 4 с). При этом, чтобы рассматривать $A(t)$ как огибающую быстро осциллирующей функции $\zeta(t)$, необходимо также, чтобы кривая $A(t)$ касалась кривой $\zeta(t)$ в точках максимальных (амплитудных) значений. Этому условию отвечают преобразования Гильберта [21, 22]:

$$\zeta(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta_1(\tau)}{\tau - t} d\tau, \quad (5)$$

$$\zeta_1(t) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta(\tau)}{\tau - t} d\tau, \quad (6)$$

причем здесь имеются в виду главные значения несобственных интегралов. А функция $\zeta_1(t)$ называется функцией, сопряженной функции $\zeta(t)$.

Для вычисления огибающей использовался алгоритм преобразования Гильберта, встроенный в программу Кута [14, 15]. Огибающая вычисляется как разность исходного значения и результата преобразования Гильберта по формуле:

$$p_1 = p_0 - \sqrt{H_r^2 + H_{im}^2}, \quad (7)$$

где p_0 – исходное значение, p_1 – новое значение, H_r – действительная часть результата преобразования Гильберта, H_{im} – мнимая часть результата преобразования Гильберта.

Использование преобразования Гильберта для сравнения временных рядов колебаний с периодами, различающимися на несколько порядков, оказалось весьма эффективным способом анализа и продемонстрировало хо-

рошее совпадение огибающих волновых процессов, что убедительно показывает передачу энергии от атмосферных возмущений семи-часовой сейше. При этом максимальные амплитуды сейш наступают через 10–15 ч после максимума высот ветровых волн и зыби. Эти два обстоятельства – увеличение высоты сейши при приходе атмосферного возмущения в район Поронайска и время наступления максимумов сейш – необходимо учитывать при выполнении работ в порту.

Также были проанализированы погодные условия для максимальных высот сейш 12 октября с использованием синоптических карт, предоставленных Сахалинским УГМС. Синоптическая карта по состоянию на время подхода циклона к акватории зал. Терпения 11.10.2008 на 6:00 UTC с отмеченным на ней положением центра циклона на 00:00 ч 12.10.2008 показана на рис. 5. Видно, что увеличение высоты сейш с периодом 7 ч (рис. 4 а) наблюдается после прохождения циклона над зал. Терпения. Это также подтверждает связь атмосферных возмущений с высотой сейшевых колебаний уровня с периодом около 7 ч.

Очевидно, что для сейш с периодом 3.5 ч в районе Поронайска, пик которых находится в спектральной плотности временного ряда с вычтенным предвычисленным приливом (рис. 3), энергия возбуждения передается от приливной гармоника, которая присутствует в спектральной плотности временного ряда с приливом (рис. 3). Поскольку периоды обеих волн почти совпадают – разница видна лишь при детальном увеличении и составляет 0.01 ч, это может быть связано с погрешностями вычисления спектральной плотности. Согласно данным [23], приливная гармоника $4M\sigma_7$ для мелкой воды имеет период 3.5 ч, и можно заключить, что именно от этой гармоника энергия напрямую, резонансным способом передается сейше, что возможно при высокой добротности резонансной акватории.

Для зал. Терпения расчет добротности, Q , резонансной системы проводили из спектров, основываясь на том, что добротность обуславливает относительную величину резонансного максимума в энергетическом спектре колебаний [24], и если система обладает достаточно высокой добротностью, то она определяется выражением

$$Q = \omega_0 / \Delta\omega, \quad (7)$$

где ω_0 – резонансная частота системы (резонансного максимума), $\Delta\omega$ – ширина максимума. При этом ширина максимума определяется как полоса частот, в пределах которой энергия колебаний спадает в 2 раза [24].

Расчет показал, что для зал. Терпения $Q = 11.9$. Это большая для морских акваторий величина. Так, для сильно закрытой Малокурильской бухты ее величина около 8 [25]. Поэтому в данном случае резонансный путь передачи энергии от приливной гармоника не вызывает сомнений.

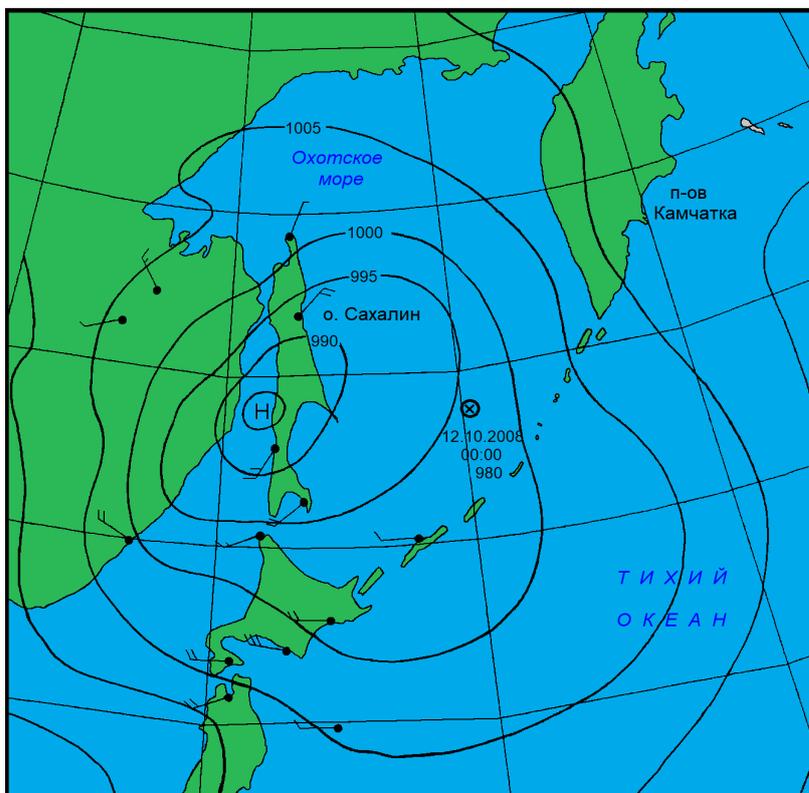


Рис. 5. Синоптическая карта на 11.10.2008 г., 6:00 UTC по данным Гидрометеоцентра Сахалинского УГМС. Показано положение центра циклона на 12.10.2008.

Fig. 5. Synoptic map for 11.10.2008, at 6:00 UTC according to the Hydrometeorological Centre of Sakhalin Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. The location of the cyclone centre is shown for 12.10.2008.

Далее рассмотрим возможный источник энергии для сейш с периодом 2.7 ч. Так же, как и в случае анализа для сейш с периодом 7 ч, были вычислены и построены отфильтрованные временные ряды колебаний уровня моря с периодом 2.7 ч (рис. 6 а) и спектрограммы спектральной плотности колебаний уровня для разных диапазонов периодов (рис. 6 с, d), поскольку энергия колебаний в этих диапазонах различается на 2 порядка и на одной спектрограмме колебания с малой энергией плохо отображаются.

Сравнение временных рядов и спектрограмм (рис. 6) показывает, что наибольшие высоты сейш с периодом 2.7 ч наблюдаются на 6–8-е сутки после максимума суточного прилива с периодом 24.68 ч. Этот период в соответствии с данными работы [23] близок к периоду лунной приливной гармонике M_1 . Может показаться, что максимум высоты сейш соответствует максимальной воде полусуточного прилива с периодом 12.3 ч, который соответствует лунной приливной гармонике $M_2(KS)_2$ [23]. Однако при внимательном рассмотрении видно, что для максимума этой приливной волны 19 августа максимум сейш с периодом 2.7 ч отсутствует (рис. 6 с, d). Да и отношение периодов этих волн далеко от целого числа, что показывает невозможность передачи энергии от этой приливной волны сейшам с периодом 2.7 ч.

В работе [12] на основе анализа 10-летнего временного ряда цифровых данных о приливах с о. Магуэйс, Пуэрто-Рико, показано, что в уровне моря, при частоте основного нормального режима сейш на шельфе, имеет место выраженный двухнедельный подъем высоты сейш с максимумом, приходящимся на 6–7 дней после новолуния и полнолуния. В указанной работе также утверждается, что сейши возбуждаются внутренними волнами, создаваемыми сильными приливами в юго-восточной части Карибского моря.

В нашем случае похожая ситуация, однако проверить возможность возбуждения сейш внутренними волнами не представляется возможным по причине неисправности канала измерения температуры у использованных нами приборов.

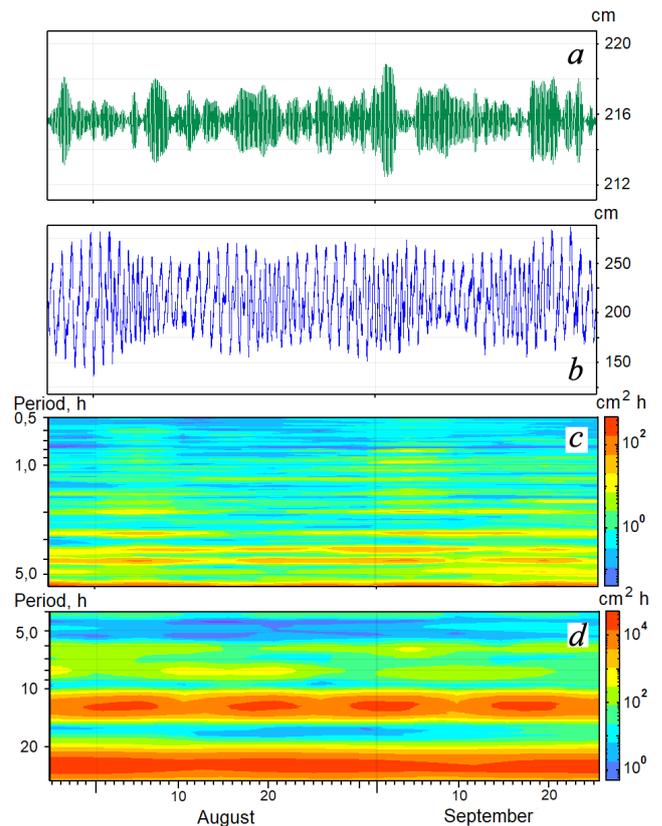


Рис. 6. Колебания уровня моря (cm) с периодом 2.7 ч (а), колебания уровня моря (b) и диаграммы спектральной плотности колебаний уровня моря ($\text{cm}^2 \cdot \text{h}$) (с, d).

Fig. 6. Sea level oscillations (cm) with a period of 2.7 hours (a), sea level oscillations (b) and the diagrams of spectral density of sea level oscillations ($\text{cm}^2 \cdot \text{h}$) (c, d).

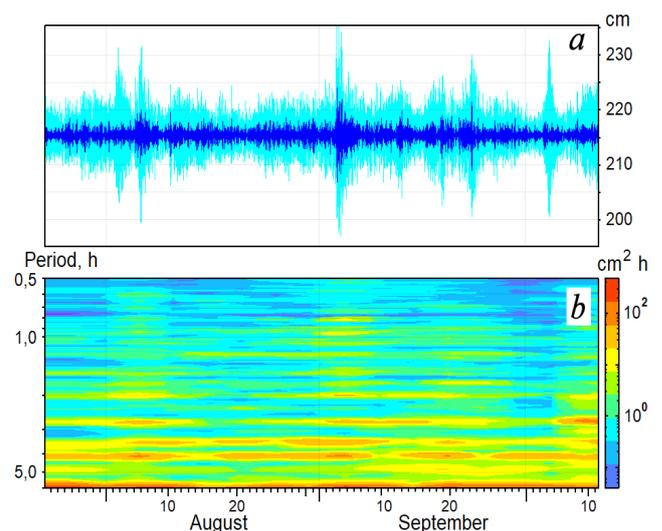


Рис. 7. Временной ряд колебаний уровня моря (cm) с периодом 2 ч (а, синий цвет), временной ряд ветрового волнения и зыби (а, голубой цвет) и спектрограмма колебаний уровня моря ($\text{cm}^2 \cdot \text{h}$) (b).

Fig. 7. Time series of sea level oscillations (cm) with a period of 2 hours (a, blue), time series of wind waves and swell (a, cyan) and spectrogram of sea level oscillations ($\text{cm}^2 \cdot \text{h}$) (b).

Для сейш с периодом около 2 ч также из исходного временного ряда колебаний уровня моря, зарегистрированного прибором № 19, был рассчитан временной ряд колебаний уровня с периодом 2 ч (рис. 7 а, синий цвет) и проведено его сравнение с временными рядами ветрового волнения и зыби (рис. 7 а, голубой цвет), а также со спектрограммой (рис. 7 б).

Из сравнения рис. 7 а и б видно, что максимумы высот сейш с периодом около 2 ч в некоторых случаях совпадают с максимумом высоты сейш с периодом 2.7 ч, например 6 августа и 4 сентября. Но, как было показано выше, приливная волна передает энергию на возбуждение сейш с периодом 2.7 ч. Поэтому нельзя исключать, что некоторая часть энергии приливной волны может передаваться и сейшам с периодом около 2 ч, при совпадении определенной фазы приливной волны и штормового волнения, вызванного атмосферным возмущением.

Выводы

Описаны результаты изучения возможных источников энергии возбуждения сейш в районе Поронайска (о. Сахалин, зал. Терпения, Охотское море) с использованием данных натурных наблюдений за волнением. Измерения проводились с секундной дискретностью с помощью двух автономных регистраторов волнения АРВ 14 в 2008 и 2009 гг. Продолжительность полученных временных рядов составляет около 3 мес.

Расчет спектральных плотностей колебаний уровня моря по исходным временным рядам и временным рядам с вычтенным предвычисленным приливом позволил определить, какие пики в спектрах являются приливными гармониками, а какие могут быть отнесены к сейшам. По результатам анализа спектральных плотностей выделены волновые процессы с периодами около 7, 3.5, 2.7 и 2 ч. Показано, что средние амплитуды в пределах энергетических пиков этих волн находятся в диапазоне от 4.1 см для периода 2 ч до 11.1 см для периода 7 ч. Более короткопериодные волновые процессы, в связи с их небольшой энергией, не рассматривались.

С использованием различных численных методов расчета определены возможные пери-

оды собственных колебаний в зал. Терпения. Полученные значения периодов близки к пикам в спектральных плотностях, вычисленных с использованием натурных данных, следовательно, эти волновые процессы с периодами около 7, 3.5, 2.7 и 2 ч могут быть отнесены к сейшам.

Анализ возможных источников энергии, которые могут возбудить сейши в зал. Терпения, показал, что максимальные высоты сейш с периодом 7 ч соответствуют максимумам ветрового волнения и зыби. Для временных рядов волн зыби, ветровых волн и семичасовой сейши были вычислены огибающие этих процессов, с использованием преобразования Гильберта. Огибающие показали хорошее совпадение пиков в волновых процессах, что подтвердило передачу энергии от атмосферных возмущений семичасовой сейше.

Показано, что для сейш с периодом 3.5 ч в районе Поронайска, пик которых находится в спектральной плотности временного ряда с вычтенным предвычисленным приливом, и приливной гармонике $4M_{\sigma_7}$, которая присутствует в спектральной плотности временного ряда с приливом, периоды обеих волн – приливной и сейши почти совпадают.

Сравнение временных рядов колебаний уровня моря – исходного, второго с периодом 2.7 ч и спектрограммы колебаний уровня моря – показало, что наибольшие высоты сейш с периодом 2.7 ч наблюдаются на 6–8-е сутки после максимума суточного прилива с периодом 24.68 ч, который близок к периоду лунной приливной гармонике M_1 .

Показано, что максимальные высоты сейш с периодом 2 ч соответствуют максимальным высотам ветрового волнения и зыби, т.е. энергия на возбуждение сейш с периодом 2 ч, по крайней мере ее часть, поступает от атмосферных возмущений. Случаи отсутствия генерации сейш при штормовом волнении объясняются тем, что увеличение высоты сейш происходит при ветрах южных румбов, способствующих приходу волн в зал. Терпения.

Изучение энергетических источников возбуждения сейш необходимо для прогнозирования по их поведению возможного значительного роста высоты сейш, что может создавать проблемы при проведении погрузо-разгрузочных работ в порту Поронайск.

Список литературы

- Ковалев Д.П., Ковалев П.Д. **2020**. Особенности волнового режима в заливе Терпения. *Экологические системы и приборы*, 11: 20–28. <https://doi.org/10.25791/esip.11.2020.1190>
- Рабинович А.Б. **1993**. *Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение*. Л.: Гидрометеоздат, 325 с.
- Wilson B.W. **1972**. Seiches. *Advances in Hydroscience*, 8: 1–94. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-021808-0.50006-1>
- Korgen B.J. **1995**. Seiches, transient standing-wave oscillations in water bodies can create hazards to navigation and unexpected changes in water conditions. *American Scientist*, 83: 330–341.
- De Jong M. **2004**. *Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbor basins*. The Netherlands: Partners Ipskamp Beheer B.V., 119 p.
- Rabinovich A.B. **2009**. Seiches and harbor oscillations. In: *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. Singapore: World scientific publ. comp., p. 193–236. https://doi.org/10.1142/9789812819307_0009
- Defant A. **1961**. *Physical oceanography*. Vol. 2. Pergamon Press, 598 p. <https://doi.org/10.1126/science.134.3488.1412>
- Rabinovich A.B., Monserrat S. **1996**. Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands: descriptive and statistical analysis. *Natural Hazards*, 13(1): 55–90.
- Monserrat S., Vilibi'c I., Rabinovich A.B. **2006**. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6: 1035–1051.
- Hibiya T., Kajiura K. **1982**. Origin of Abiki phenomena (a kind of seiches) in Nagasaki Bay. *J. of Oceanography (of the Oceanographic Society of Japan)*, 38(3): 172–182. <https://doi.org/10.1007/bf02110288>
- De Jong M.P.C., Holthuijsen L.H., Battjes J.A. **2003**. Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea. *J. of Geophysical Research Atmospheres*, 108(4): 3117. <https://doi.org/10.1029/2002jc001422>
- Giese G.S., Chapman D.C., Black P.G., Fornshell J.A. **1990**. Causation of large-amplitude coastal seiches in the Caribbean coast of Puerto Rico. *J. of Physical Oceanography*, 20(9): 1449–1458. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1990\)020<1449:colacs>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1990)020<1449:colacs>2.0.co;2)
- Giese G.S., Chapman D.C. **1993**. Coastal seiches. *Oceanus*, 36(1): 38–46.
- Плеханов Ф.А., Ковалев Д.П. **2016**. Программа комплексной обработки и анализа временных рядов данных уровня моря на основе авторских алгоритмов. *Геоинформатика*, 1: 44–53.
- Ковалев Д.П. **2018**. *Кута*: патент RU № 2018618773. Заявл. 20.03.2018; опублик. 19.07.2018.
- Ковалев П.Д., Шевченко Г.В. **2008**. *Экспериментальные исследования длинноволновых процессов на северо-западном шельфе Тихого океана*. Владивосток: Дальнаука, 215 с.
- Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В. **2016**. Исследование свободных колебаний жидкости в ограниченном бассейне, представляющем приближенную модель Азовского моря. *Морской гидрофизический журнал*, 2: 16–26. <https://doi.org/10.22449/1573-160x-2016-2-14-23>
- Судольский А.С. **1991**. *Динамические явления в водоемах*. Л.: Гидрометеоздат, 263 с.
- Райхлен Ф. **1970**. Резонанс гавани. В кн.: *Гидродинамика береговой зоны и эстуариев*: пер. с англ. Л.: Гидрометеоздат, с. 114–166.
- Арсеньева Н.М., Давыдов Л.К., Дубровина Л.Н., Конкина Н.Г. **1963**. *Сейши в озерах СССР*. Л.: Изд-во ЛГУ, 184 с.
- Гоноровский И.С. **1967**. *Радиотехнические цепи и сигналы*. М.: Сов. радио, т. 1, 439 с.
- Морс Ф.М., Фешбах Г. **1958**. *Методы теоретической физики*: пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., т. 1, 930 с. URL: <https://www.amazon.com/Methods-Theoretical-Physics-International-Applied/dp/007043316X> (дата обращения 30.05.2022).
- Parker B.B. **2007**. *Tidal analysis and prediction*. Maryland: Silver Spring, 378 p.
- Зернов Н.В., Карпов В.Г. **1972**. *Теория радиотехнических цепей*. Л.: Энергия, 816 с.
- Ковалев П.Д., Ковалев Д.П. **2013**. Особенности сейшевых колебаний в заливах и бухтах Дальнего Востока: Приморья, Сахалина, южных Курильских островов. *Вестн. Тамбовского университета, Сер. Естественные и технические науки*, 18(4): 1377–1382.

References

- Kovalev D.P., Kovalev P.D. **2020**. [Peculiarities of the wave regime in Terpeniya Bay]. *Ekologicheskie sistemy i pribory = Ecological Systems and Devices*, 11: 20–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.25791/esip.11.2020.1190>
- Rabinovich A.B. **1993**. *Dlinnye gravitatsionnye volny v okeane: zakhvat, rezonans, izluchenie [Long gravitational waves in the ocean: entrapment, resonance, emission]*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 325 p. (In Russ.).
- Wilson B.W. **1972**. Seiches. *Advances in Hydroscience*, 8: 1–94. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-021808-0.50006-1>
- Korgen B.J. **1995**. Seiches, transient standing-wave oscillations in water bodies can create hazards to navigation and unexpected changes in water conditions. *American Scientist*, 83: 330–341.
- De Jong M. **2004**. *Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbor basins*. The Netherlands: Partners Ipskamp Beheer B.V., 119 p.
- Rabinovich A.B. **2009**. Seiches and harbor oscillations. In: *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. Singapore: World scientific publ. comp., p. 193–236. https://doi.org/10.1142/9789812819307_0009
- Defant A. **1961**. *Physical oceanography*. Vol. 2. New York: Pergamon, 598 p. <https://doi.org/10.1126/science.134.3488.1412>
- Rabinovich A.B., Monserrat S. **1996**. Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands: descriptive and statistical analysis. *Natural Hazards*, 13(1): 55–90. <https://doi.org/10.1007/bf00156506>
- Monserrat S., Vilibi'c I., Rabinovich A.B. **2006**. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6: 1035–1051.
- Hibiya T., Kajiura K. **1982**. Origin of Abiki phenomena (a kind of seiches) in Nagasaki Bay. *J. of Oceanography (of the Oceanographic Society of Japan)*, 38(3): 172–182. <https://doi.org/10.1007/bf02110288>
- De Jong M.P.C., Holthuijsen L.H., Battjes J.A. **2003**. Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea. *J. of Geophysical Research Atmospheres*, 108(4): 3117. <https://doi.org/10.1029/2002jc001422>
- Giese G.S., Chapman D.C., Black P.G., Fornshell J.A. **1990**. Causation of large-amplitude coastal seiches in the Caribbean coast of Puerto Rico. *J. of Physical Oceanography*, 20(9): 1449–1458. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1990\)020<1449:colacs>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1990)020<1449:colacs>2.0.co;2)

13. Giese G.S., Chapman D.C. **1993**. Coastal seiches. *Oceanus*, 36(1): 38–46.
14. Plekhanov F.A., Kovalev D.P. **2016**. [Program for complex processing and analysis of time-series of sea level data based on the proprietary algorithms]. *Geoinformatika*, 1: 44–53. (In Russ.).
15. Kovalev D.P. **2018**. *Кума*: patent RU № 2018618773. Appl. 20.03.2018; publ. 19.07.2018. (In Russ.).
16. Kovalev P.D., Shevchenko G.V. **2008**. *Eksperimental'nye issledovaniya dlinnovolnovykh protsessov na severo-zapadnom shel'fe Tikhogo okeana [Experimental studies of long-wave processes on the Pacific northwest shelf]*. Vladivostok: Dal'nauka, 215 p. (In Russ.).
17. Maniliuk Yu.V., Cherkesov L.V. **2016**. Investigation of free liquid oscillations in a bounded basin representing an approximate model of the Sea of Azov. *Morskoy Gidrofizicheskii Zhurnal = Physical Oceanography*, 2: 16–26. <https://doi.org/10.22449/1573-160x-2016-2-14-23>
18. Sudol'skij A.S. **1991**. *Dinamicheskie yavleniya v vodoemakh [Dynamic phenomena in water bodies]*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 263 p. (In Russ.).
19. Rajkhlen F. **1970**. [Harbour resonance]. In: *Gidrodinamika beregovoi zony i estuariyev*: transl. from Engl. Leningrad: Gidrometeoizdat, p. 114–166.
20. Arsen'eva N.M., Davydov L.K., Dubrovina L.N., Konkina N.G. **1963**. [*Seiches on the lakes of the USSR*]. Leningrad: Izd-vo LGU, 184 p. (In Russ.).
21. Gonorovskii I.S. **1967**. [*Radio engineering circuits and signals*]. Moscow: Sovetskoye radio, vol. 1, 439 p. (In Russ.).
22. Morse Ph.M., Feshbakh G. **1958**. *Methods of theoretical physics*: transl. from Engl. Moscow: Izd-vo inostr. lit., vol. 1, 930 p. URL: <https://www.amazon.com/Methods-Theoretical-Physics-International-Applied/dp/007043316X> (accessed 30.05.2022).
23. Parker B.B. **2007**. *Tidal analysis and prediction*. Maryland: Silver Spring, 378 p.
24. Zernov N.V., Karpov V.G. **1972**. [*Theory of radio engineering circuits*]. Leningrad: Energiya, 816 p. (In Russ.).
25. Kovalev P.D., Kovalev D.P. **2013**. Seiche vibrations features in bays and inlets of Far East: Primorye, Sakhalin, Southern Kuril Islands. *Vestn. Tambovskogo universiteta, Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 18(4): 1377–1382. (In Russ.).

Об авторах

Сотрудники лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск:

Ковалев Дмитрий Петрович (<https://orcid.org/0000-0002-5184-2350>), доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории, d.kovalev@imgg.ru

Ковалев Петр Дмитриевич (<https://orcid.org/0000-0002-7509-4107>), доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, p.kovalev@imgg.ru

Борисов Александр Сергеевич (<https://orcid.org/0000-0002-9026-4258>), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, a.borisov@imgg.ru

Зарочинцев Виталий Сергеевич (<https://orcid.org/0000-0002-4015-9441>), научный сотрудник, zarochintsev@imgg.ru

Кириллов Константин Владиславович (<https://orcid.org/0000-0002-0822-3060>), научный сотрудник, k.kirillov@imgg.ru

Поступила в редакцию 10.05.2022
После рецензирования 1.06.2022
Принята к публикации 6.06.2022

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:

Kovalev, Dmitry P. (<https://orcid.org/0000-0002-5184-2350>), Doctor of Physics and Mathematics, Head of the laboratory, d.kovalev@imgg.ru

Kovalev, Peter D. (<https://orcid.org/0000-0002-7509-4107>), Doctor of Engineering, Leading Researcher, p.kovalev@imgg.ru

Borisov, Aleksander S. (<https://orcid.org/0000-0002-9026-4258>), Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, a.borisov@imgg.ru

Zarochintsev, Vitalii S. (<https://orcid.org/0000-0002-4015-9441>), Researcher, zarochintsev@imgg.ru

Kirillov, Konstantin V. (<https://orcid.org/0000-0002-0822-3060>), Researcher, k.kirillov@imgg.ru

Received 10 May 2022
Revised 1 June 2022
Accepted 6 June 2022

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



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

УДК 551.248.2,551.89

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.124-129>
<https://www.elibrary.ru/pdeywh>

Моделирование вертикальных смещений в результате мантийной конвекции на профиле через Охотское море

Р. Ф. Булгаков

E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

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

Реферат. Вертикальные движения, особенно в районах активных материковых окраин, таких как Курило-Камчатская переходная зона, плохо изучены. Одним из факторов, существенно влияющих на амплитуду и направление вертикальных движений в переходных зонах, является мантийная конвекция. Путем численного моделирования мантийной конвекции, выполненного методом конечных элементов, получены оценки значений вертикальных подвижек в регионе. При принятых скоростях мантийной конвекции от 1 до 5 мм/год получены значения воздыманий района о. Сахалин и Курильской гряды от 0–3 до 13 м. Полученные результаты следует учитывать при реконструкциях неотектонической истории региона и оценках геодинамической ситуации региона Охотского моря.

Ключевые слова: мантийная конвекция, Охотоморской регион, вертикальные движения, метод конечных элементов, граница Мохо

Vertical motion modeling as a result of mantle convection on the Sea of Okhotsk profile

Rustam F. Bulgakov

E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

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

Abstract. Vertical motions, especially in the active continental margins such as Kuril-Kamchatka transition zone, are still pure studied. One of the factors significantly affecting the amplitudes and directions of vertical motions is mantle convections. Estimates of the amplitudes of vertical motions in region have been obtained by means of numerical modeling of the mantle convection made by the method of finite elements. The values of emergences in the area of Sakhalin Island and the Kuril Ridge from 0–3 to 13 m were obtained with the accepted rates of mantle convection from 1 to 5 mm/year. The results obtained should be taken into account when reconstructing neotectonic history of the region and assessing the geodynamic situation in the region of the Sea of Okhotsk.

Keywords: mantle convection, region of the Sea of Okhotsk, vertical motions, method of finite elements, Moho discontinuity

Для цитирования: Булгаков Р.Ф. Моделирование вертикальных смещений в результате мантийной конвекции на профиле через Охотское море. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 2, с. 124–129. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.124-129>; <https://www.elibrary.ru/pdeywh>

For citation: Bulgakov R.F. Vertical motion modeling as a result of mantle convection on the Sea of Okhotsk profile. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 124–129. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.124-129>; <https://www.elibrary.ru/pdeywh>

Введение

Расчетам мантийной конвекции посвящены классические работы известных отечественных специалистов – А.П. Трубицына, Н.Л. Добрецова, А.Г. Кирдяшкина (см., например, [1]). В них решаются глобальные проблемы термодинамики конвекции; объясняются планетарные геологические особенности формирования

Земли. Настоящая работа представляет собой попытку решить частную, локальную задачу – определить вклад конвекции в вертикальные движения в Охотоморском регионе.

Мантийная конвекция в непосредственной близости к зоне субдукции, где мантийный поток упирается в погружающуюся плиту, вызывает кроме горизонтальных перемещений

еще и вертикальные смещения. При этом среди факторов, слагающих суммарный эффект вертикальных неотектонических движений, включая эффекты гидроизостазии, вклад от мантийной конвекции в районах активных континентальных окраин (таких как Курило-Камчатская зона субдукции) может иметь решающее значение.

Менее изученной стороной вклада мантийной конвекции в вертикальные смещения для зон субдукции островодужного типа является задуговая область, в то время как на изучении динамики преддуговой области концентрируется основное внимание.

Для оценки вклада конвекции в вертикальные движения и сопоставления этих оценочных значений с амплитудой вертикальных движений, обусловленных эффектом гидроизостазии, в данной работе предпринята попытка выполнить численное моделирование мантийной конвекции в задуговой области района субдукции островодужного типа в условиях близких к условиям района Охотского моря – Курильских островов.

Модель

Для выполнения моделирования мантийной конвекции и ее вклада в амплитуду вертикальных движений была построена 2D-сетка (mesh) (рис. 1) слоя литосферы и мантийных слоев до глубины 1080 км. Литосферный слой построен с использованием реального топо-

графо-батиметрического профиля земной поверхности на основе данных батиметрии Topex (https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi) и реальной границы Мохо из базы данных Crust 2.0 (<https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>). Параметры поверхности погружающейся плиты взяты из работ [1, 2].

Построение сетки (рис. 1) выполнялось в программных пакетах с открытым кодом и открытым доступом: Salome (<https://salome-platform.org/>) и FreeCAD (<https://www.freecadweb.org/>).

Модель строилась для двух слоев мантии: примерно 300-километровый слой, в котором происходит течение мантийного вещества, что соответствует оценкам в работе [1], и подлежащий неподвижный слой до глубины 1080 км. Протяженность модели 2120 км, профиль А–В пересекает Охотское море от континентальной части в районе хр. Джугджур до Тихого океана (рис. 2). Реологические свойства слоев даны в таблице.

Расчет выполнялся в программном пакете с открытым кодом и в свободном доступе Elmer (<https://www.csc.fi/web/elmer>). Программный пакет предназначен для решения широкого круга задач методом конечных элементов (МКЭ).

Течение мантийного вещества моделировалось в верхнем мантийном слое глубиной 407 км [1, 3], поток направлялся от континентальной стороны в сторону океана (рис. 1 а, в). Скорость потока моделировалась в верхней

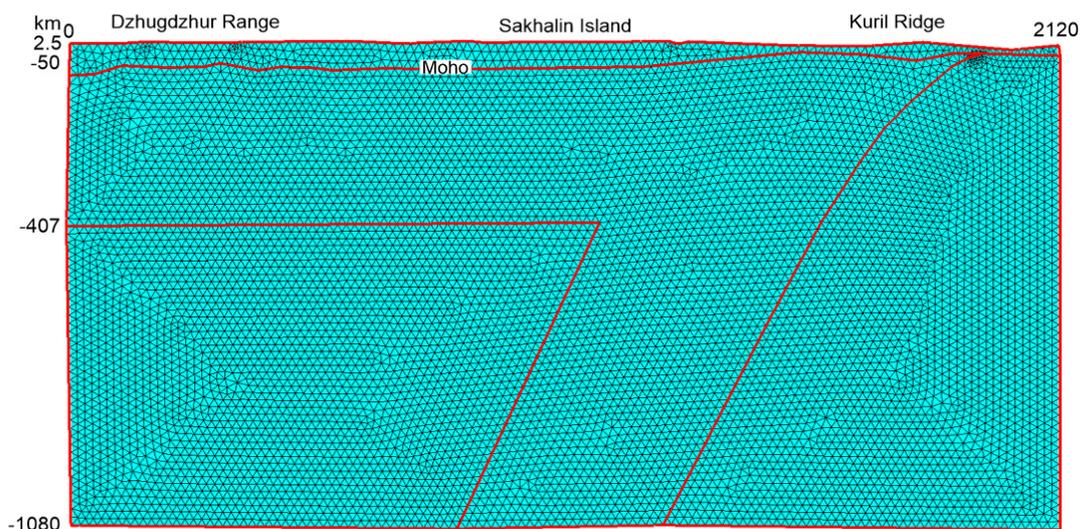


Рис. 1. Двумерная сетка для моделирования мантийной конвекции и оценки вертикальных движений методом конечных элементов (МКЭ).

Fig. 1. Two-dimensional grid for the mantle convection modeling and assessment of vertical motions by the method of finite elements (MFE).

Таблица. Характеристики литосферы и мантии, принятые в работе для модели
Table. Lithosphere and mantle characteristics taken in the work for modeling

| Слой | Плотность, кг/м ³ | Модуль Юнга, ×10 ¹¹ Па | Вязкость, Па·с | Коэффициент Пуассона |
|------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------|
| Литосфера | 3233.6 | 0.45 | 1.0 · 10 ⁴⁴ | 0.49 |
| Верхний слой мантии | 3367.12 | 2.0 | 0.5 · 10 ¹⁸ | 0.49 |
| Подлежащий слой мантии | 3988.07 | 0.85 | 0.5 · 10 ²¹ | 0.49 |

части мантийного слоя, непосредственно под литосферой, с линейным уменьшением скорости до нуля на границе с нижним мантийным слоем. В модели были приняты два варианта значения скорости: $0.34 \cdot 10^{-9}$ м/с, что соответствует 1 мм/год, и $1.54 \cdot 10^{-9}$ м/с (5 мм/год) [4]. Поток должен был идти горизонтально до границы погружающейся плиты и погружаться вдоль ее границы.

Взаимодействие потока с границами происходило по специальной процедуре «вза-

имодействия жидкой и твердой среды» (fluid structure interaction – FSI) [5]. Суть процедуры заключается в определении сил, действующих на поверхность, выводимых из решения уравнения Навье–Стокса для потока. Сначала при допущении, что геометрия поверхности, с которой взаимодействует вязкая жидкость, постоянна, решается уравнение Навье–Стокса с неподвижными граничными поверхностями для скорости потока. Затем рассчитываются силы, воздействующие на поверхность твердого тела.

С использованием этих величин рассчитываются деформации в твердом теле. Полученные деформации вновь принимаются как постоянные, и повторяется решение для флюида. Процесс повторяется до достижения заданного значения сходимости.

Мантийный поток при движении взаимодействовал через процедуру FSI с нижней границей литосферы.

Уравнение Навье–Стокса и уравнение деформирования твердого тела решалось при следующих условиях: максимальное количество итераций – 500; итерации – BiCGStab (стабилизированный метод бисопряженных градиентов); материал несжимаемый максвелловского типа; предел сходимости итерации – 10^{-7} ; предобуславливатель – неполное LU-разложение без заполнения ILU0.

Неподвижными элементами модели были определены боковые и нижние стороны модели и поверхность «погружающейся плиты». Земная поверхность оставалась свободной.

Решение выполнялось по типу «переходящее» (transient) с точностью схождения до -7 степени с временными интервалами шага в 1 млн лет до 30 шагов, т.е. 30 млн лет.

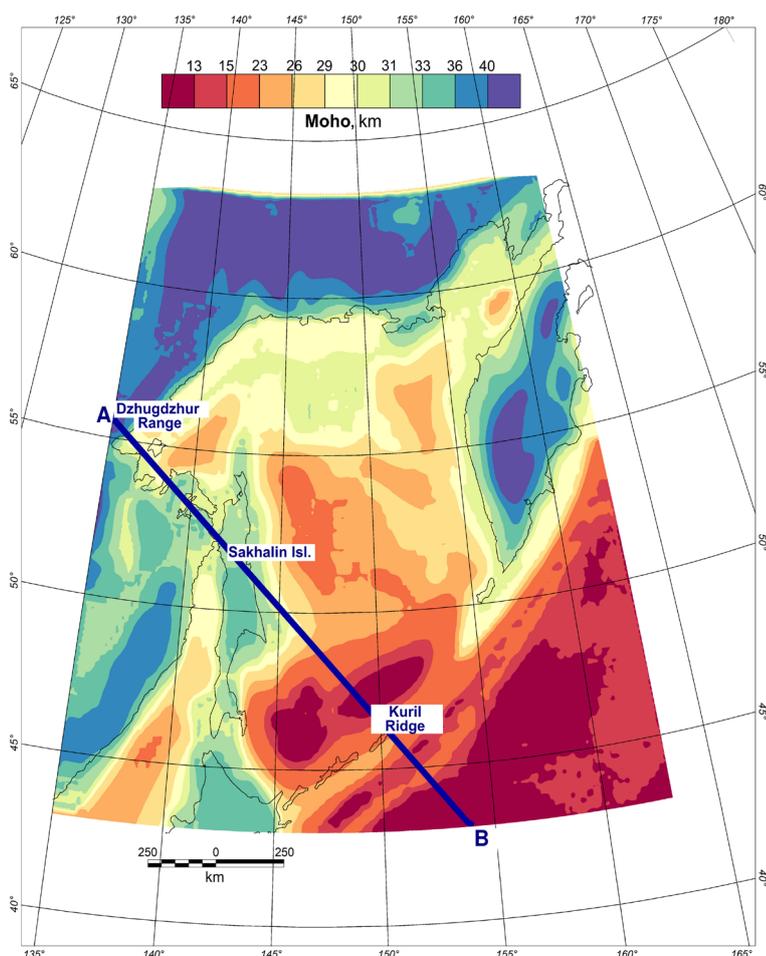


Рис. 2. Схема расположения профиля, выбранного для моделирования (линия А–В). Цветом показана глубина до границы Мохо (в км).

Fig. 2. Location scheme of the profile selected for modeling (line A–B). The depth down to Moho discontinuity (in km) is shown by color.

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования, при заданных параметрах, показали восходящие вертикальные движения с амплитудой, варьирующей от 0 до 3 м при скорости потока 1 мм/год (рис. 3) и увеличивающейся до 10–13 м при скорости 5 мм/год. Заметные участки воздыманий земной поверхности локализовались на участках профиля с центром в районе о. Сахалин и Курильской гряды (рис. 3). Надо заметить, что

наблюдается связь амплитуд вертикальных дислокаций с конфигурацией границы Мохо.

Горизонтальные смещения по большей части имеют незначительное отрицательное значение под континентальной частью профиля, т.е. в этом месте верхняя часть литосферы испытывает растяжения. Но начиная с района западнее о. Сахалин и до Курильской гряды горизонтальные смещения согласуются с направлением мантийной конвекции и испытывают сжатие.

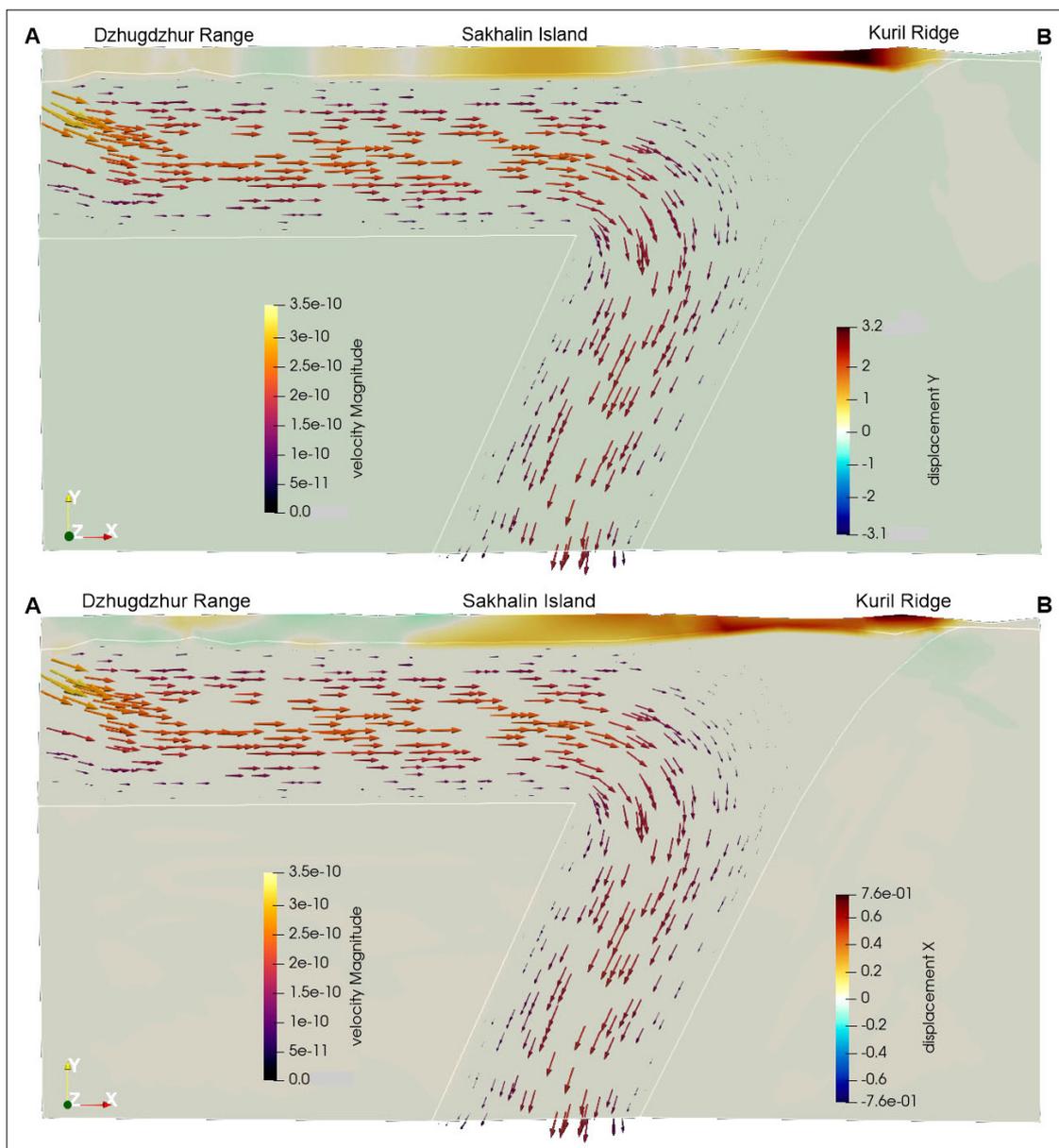


Рис. 3. Результаты моделирования мантийной конвекции по профилю А–В с иллюстрацией смещений по горизонтали – координате у (вверху) и координате x. Шкала Displacement Y – амплитуда вертикальных смещений (в м). Шкала Velocity Magnitude – значения скоростей мантийной конвекции (в м/с), данная шкала относится к стрелкам.

Fig. 3. The results of mantle convection modeling along profile A–B with illustration of the horizontal displacements – along y coordinate (up) and along x coordinate. Displacement Y scale is an amplitude of vertical displacements (in m). Velocity Magnitude scale represents the values of mantle convection velocities (in m/s), this scale refers to the arrows.

Необходимо отметить, что моделирование выполнялось со следующими допущениями:

- для моделирования использована ограниченная по размеру область пространства;
- погружающаяся океаническая плита в модели сохранялась закрепленной и неподвижной;
- не учитывались горизонтальные, вращательные движения Охотоморской плиты;
- не учитывались термические особенности, вызванные мантийной конвекцией;
- не учитывалось влияние гидроизостазии на амплитуду вертикальных движений;
- глубина, до которой происходит движение мантийного потока, заимствована из результатов термодинамического моделирования [1, 3], следовательно, может иметь отклонения от реальных масштабов конвекции.

Это ограничило приближение модели к реальности. Но основную задачу – определить влияние мантийной конвекции на тенденции в вертикальных движениях земной коры для Охотоморского региона – удалось решить.

Учитывая, что оценки амплитуды вертикальных движений по следам поднятых древних береговых линий для временных интервалов от 190 до 120 тыс. лет назад варьируют, например, для о. Сахалин от 40 до 10–11 м [6], следует признать, что мантийная конвекция, в зависимости от скорости потока мантийного вещества, способна вносить существенный вклад в неотектонические вертикальные движения и без нее очертания береговой линии и топо-батиметрия могли бы иметь другую конфигурацию.

Современный конвективный поток в верхней мантии в Охотоморском регионе, предположительно, сформировался синхронно с современным морфоструктурным планом в конце неогена – начале плейстоцена [7, 8]. Остается открытым вопрос, насколько на протяжении этого времени поток сохранял свою стабильность относительно распределения в нем давления, чтобы иметь возможность изменять тенденции в вертикальных смещениях.

Амплитуды вертикальных смещений в результате эффекта гидроизостазии – изменений нагрузки водного столба в 100–130 м, которые происходили при смене ледниковых эпох межледниковьями, достигают нескольких метров

в зависимости от реологических свойств мантийных слоев [9]. Это соизмеримо с параметрами вертикальных смещений, полученными при моделировании конвективного потока. Моделирование также показало зависимость вертикальных смещений от мощности земной коры. Это ставит вопрос о характере взаимодействия гидроизостазии и мантийной конвекции. Если влияние гидроизостазии прямо зависит от мощности земной коры: чем большая глубина до границы Мохо, тем большая чувствительность к нагрузке водного столба [9], то влияние конвекции на вертикальные движения в большей степени зависит от распределения давления в потоке мантийного вещества. Вклад мантийной конвекции в амплитуду вертикальных смещений играет решающую роль на участках, которые расположены ближе к островной дуге зоны субдукции.

Заключение

Моделирование вертикальных смещений в результате мантийной конвекции, при заданных условиях, дало значения вертикальных смещений в первые метры. Сравнительная оценка амплитуд вертикальных смещений вследствие мантийной конвекции для Охотоморского региона, как активной континентальной окраины, с вертикальными движениями, вызванными эффектом гидроизостазии при сменах ледниковых и межледниковых эпох, показала, что вертикальные движения, обусловленные мантийной конвекцией, в целом превышают амплитуду смещений в результате эффекта гидроизостазии.

В результате расчетов, с учетом близкой к реальной топографии района и глубины положения границы Мохо на профиле, наибольшие вертикальные смещения были получены для участка о. Сахалин и Курильской гряды с примыкающей к гряде частью Курильской впадины (Охотоморской котловины), а наименьшие и даже незначительно отрицательные – для района Шантарских островов, западного шельфа Сахалина в месте перехода в Курильскую впадину.

Следует оговориться, что максимальные положительные вертикальные смещения вблизи Курильской гряды, вызванные конвективным потоком с западной стороны, не учитывают вклада в вертикальные смещения в этом

месте в результате погружения океанической плиты. Оценка взаимодействия конвективного потока и погружающейся плиты нуждается в специальном моделировании.

При оценках геодинамической ситуации и напряженно-деформированного состояния земной коры необходимо учитывать мантийную конвекцию в задуговой области зон субдукции островодужного типа.

Список литературы

1. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. **2001**. *Глубинная геодинамика*. 2-е изд., доп. и перераб. Новосибирск: Изд-во СО РАН, фил. «ГЕО», 409 с.
2. Hayes G.P., Wald D.J., Johnson R.L. **2012**. Slab1.0: A three dimensional model of global subduction zone geometries. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B1): B01302. <https://doi.org/10.1029/2011jb008524>
3. Billen M.I., Gurnis M., Simons M. **2003**. Multiscale dynamics of the Tonga–Kermadec subduction zone. *Geophysical J. International*, 153: 359–388. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2003.01915.x>
4. Schellart W.P., Stegman D.R., Farrington R.J., Moresi L. **2011**. Influence of lateral slab edge distance on plate velocity, trench velocity, and subduction partitioning. *J. of Geophysical Research*, 116: B10408. <https://doi.org/10.1029/2011jb008535>
5. Råback P., Ruokolainen J., Lyly M., Järvinen E. **2001**. Fluid-structure interaction boundary conditions by artificial compressibility. In: *ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conference 2001, Swansea, Wales, UK, 4–7 September 2001*. URL: https://www.csc.fi/documents/49902/86943/eccomas2001_raback.pdf/8c572fe9-0406-4f90-8197-e9a78bce5810
6. Булгаков Р.Ф., Сеначин В.Н. **2019**. Морские террасы и влияние эффекта гидроизостазии на вертикальные движения Сахалина. *Геосистемы переходных зон*, 3(3): 277–286. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286>
7. Мельников О.А. **2011**. Остров Сахалин: его геологическое прошлое, настоящее и вероятное будущее. *Вестник Сахалинского музея*, Южно-Сахалинск. URL: http://old.sakhalinmuseum.ru/ufile/29_Vestnik-p262-273.pdf
8. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. **2017**. Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(1): 181–202. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>

Об авторе

Булгаков Рустам Фаридович (<https://orcid.org/0000-0001-9095-3785>), кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, r.bulgakov@imgg.ru

Поступила в редакцию 15.05.2022
После рецензирования 16.06.2022
Принята к публикации 18.06.2022

9. Булгаков Р.Ф. **2021**. 3D-моделирование эффекта гидроизостазии с близкой к реальной конфигурацией поверхности Мохо для Охотского моря. *Геосистемы переходных зон*, 5(4): 339–345. <https://doi.org/10.30730/trz.2021.5.4.339-345>

References

1. Dobretsov N.L., Kiryashkin A.G., Kiryashkin A.A. **2001**. *Deep-level geodynamics*. 2 ed., add. and rework. Novosibirsk: Publ. by the Siberian Branch of RAS, GEO, 409 p. (In Russ.). <https://www.geokniga.org/books/26050>
2. Hayes G.P., Wald D.J., Johnson R.L. **2012**. Slab1.0: A three dimensional model of global subduction zone geometries. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B1): B01302. <https://doi.org/10.1029/2011jb008524>
3. Billen M.I., Gurnis M., Simons M. **2003**. Multiscale dynamics of the Tonga–Kermadec subduction zone. *Geophysical J. International*, 153: 359–388. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2003.01915.x>
4. Schellart W.P., Stegman D.R., Farrington R.J., Moresi L. **2011**. Influence of lateral slab edge distance on plate velocity, trench velocity, and subduction partitioning. *J. of Geophysical Research*, 116: B10408. <https://doi.org/10.1029/2011jb008535>
5. Råback P., Ruokolainen J., Lyly M., Järvinen E. **2001**. Fluid-structure interaction boundary conditions by artificial compressibility. In: *ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conference 2001, Swansea, Wales, UK, 4–7 September 2001*. https://www.csc.fi/documents/49902/86943/eccomas2001_raback.pdf/8c572fe9-0406-4f90-8197-e9a78bce5810
6. Bulgakov R.F., Senachin V.N. **2019**. Marine terraces and hydroisostasy influence on the vertical movements of the Sakhalin. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(3): 277–286. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286>
7. Melnikov O.A. **2011**. Sakhalin Island: its geological past, recent and probable future. *Vestnik of the Sakhalin Museum*. http://old.sakhalinmuseum.ru/ufile/29_Vestnik-p262-273.pdf
8. 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>
9. Bulgakov R.F. **2021**. 3D modeling of the hydroisostasy effect with a configuration of Moho surface of the Sea of Okhotsk close to real. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 5(4): 339–345. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/trz.2021.5.4.339-345>

About the Author

Bulgakov, Rustam F. (<https://orcid.org/0000-0001-9095-3785>), Cand. of Sci. (Geography), Senior Researcher of Laboratory of coastal geosystems, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, r.bulgakov@imgg.ru

Received 15 May 2022
Revised 16 June 2022
Accepted 18 June 2022

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



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

ЭКСПЕДИЦИИ

УДК 551.432.7+556.5

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.130-135>
<https://www.elibrary.ru/dceb1h>

Экспедиция по изучению новых термальных проявлений на о. Итуруп в 2022 г.

А. В. Дегтерев¹, Д. Н. Козлов^{*2}, О. Р. Хубаева³, А. Л. Хомчановский⁴

E-mail: ¹d_a88@mail.ru; ²kozlovdn@bk.ru; ³grifon03@yandex.ru; ⁴khomscience@mail.ru

^{1,2}Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

^{3,4}Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Реферат. В рамках совместной научной экспедиции сотрудниками ИВиС ДВО РАН и ИМГиГ ДВО РАН в феврале 2022 г. на о. Итуруп (Южные Курильские острова) впервые были получены данные по морфологическому облику и морфометрическим параметрам котловины не отмеченного на существующих картах озера Утко-Баня, температуре и химическому составу его вод. Обследованы газогидротермы, разгружающиеся вдоль дайки мыса Конакова.

Expedition to study new thermal manifestations on Iturup Island in 2022

Artem V. Degterev¹, Dmitrii N. Kozlov^{*2}, Olga R. Hubaeva³, Anton L. Khomchanovskiy⁴

E-mail: ¹d_a88@mail.ru; ²kozlovdn@bk.ru; ³grifon03@yandex.ru; ⁴khomscience@mail.ru

^{1,2}Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

^{3,4}Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract. Within the framework of a joint scientific expedition, for the first time, the staff of IVS FEB RAS and IMGG FEB RAS obtained the data on the morphological appearance and morphometric parameters of the basin of Lake Utko-Banya, which is not marked on the existing maps, temperature and chemical composition of the lake waters. Gas-hydrotherms discharged along the dike of Konakova cape have been examined.

Для цитирования: Дегтерев А.В., Козлов Д.Н., Хубаева О.Р., Хомчановский А.Л. Экспедиция по изучению новых термальных проявлений на о. Итуруп в 2022 г. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 2, с. 130–135. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.130-135>; <https://www.elibrary.ru/dceb1h>

For citation: Degterev A.V., Kozlov D.N., Hubaeva O.R., Khomchanovskiy A.L. Expedition to study new thermal manifestations on Iturup Island in 2022. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 130–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.130-135>; <https://www.elibrary.ru/dceb1h>

В феврале 2022 г. состоялась внеплановая вулканологическая экспедиция по изучению ранее не описанных в литературе термальных проявлений о. Итуруп. Поводом для ее организации послужила информация, размещенная в социальных медиа: примерно с середины января 2022 г. туристы, гиды и местные жители о. Итуруп начали публиковать фотоснимки озера, имеющего необычный насыщенный бирюзовый цвет воды и называемого Утко-баня, Утиная баня или Утиные бани (из-за того, что в зимний период оно не замерзает и служит местом обитания местных популяций уток). На основе информации, полученной от побывавших там очевидцев, было

установлено его местоположение и основные визуальные параметры (цвет, примерная температура, глубина, интенсивность газогидротермальных проявлений и пр.). Горячие источники о. Итуруп изучены достаточно детально, их исследование ведется с середины прошлого столетия [1–3; и др.], однако ни в литературе, ни по устным сообщениям от геологов и гидрогеологов, работавших в разные годы на острове, никаких упоминаний о данном озере найти не удалось. Гидротермы на мысе Конакова упоминались ранее в работах Е.К. Мархинина [2] и Е.Г. Калачевой [4], однако никаких данных, кроме их местоположения, в этих работах не приводится.

В этой связи, сразу после получения указанной выше информации, было принято решение о срочной организации экспедиции на о. Итуруп для изучения уникального водного объекта и газогидротермальных проявлений оз. Утко-Баня (используем это название как наиболее часто встречающееся). Кроме того, было запланировано изучение горячих источников, разгружающихся в районе мыса Конакова [2, 4], так как эти источники известны относительно недавно, а их химический состав не изучен. В полевой отряд, состоящий из 4 человек, вошли сотрудники Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский (О.Р. Хубаева, А.Л. Хомчановский), и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск (А.В. Дегтерев, Д.Н. Козлов) (рис. 1).

Полевые работы включали комплекс геоморфологических и гидрохимических исследований. В частности, был произведен отбор проб термальных вод для изучения их химического состава, выполнена батиметрическая съемка озерной котловины (по методике [5] при помощи цифрового эхолота Lowrance LMS 527 CDF-iGPS (рабочая частота 200 кГц).

Физико-химические параметры определяли при помощи цифрового термометра Digitron-T200KC (термопреобразователь КТХА 01.02Р-Т310, диапазон рабочих температур от -200 до 1350 ± 0.1 °С), мобильного тепловизора Caterpillar Cat S61 (возможность фиксации температуры до 400 °С) и рН-метра Hanna HI 98130.

Оз. Утко-Баня расположено в 12 км к юго-востоку от с. Рейдово (Курильский городской округ), в центральной части о. Итуруп (рис. 2), вдали от действующих вулканов, ближайшие из которых находятся от него на расстоянии 14 (влк. Баранского) и 18 км (вулканы Чирип и Богдан Хмельницкий).

По словам местного старожила, жителя с. Рейдово, Владимира Васильевича Тарико, об озере ему известно с 70-х годов: он обнаружил его во время одного из своих многочисленных лыжных походов по окрестностям с. Рейдово, периодически посещал его и в последующие годы. Он отмечает, что визуально состояние оз. Утко-Баня за это время не изменилось: температура (определял тактильно, без использования приборов), интенсивность газовых выделений и цвет всегда оставались примерно одинаковыми на протяжении нескольких десятков лет.



Рис. 1. Участники экспедиции 2022 г. на о. Итуруп, на фоне оз. Утко-Баня (слева направо): А.В. Дегтерев, А.Л. Хомчановский, О.Р. Хубаева, Д.Н. Козлов.

Fig. 1. Participants of the expedition on Iturup Island in 2022, against the background of Lake Utko-Banya (from left to right): A.V. Degterev, A.L. Khomchanovskiy, O.R. Hubaeva D.N. Kozlov.

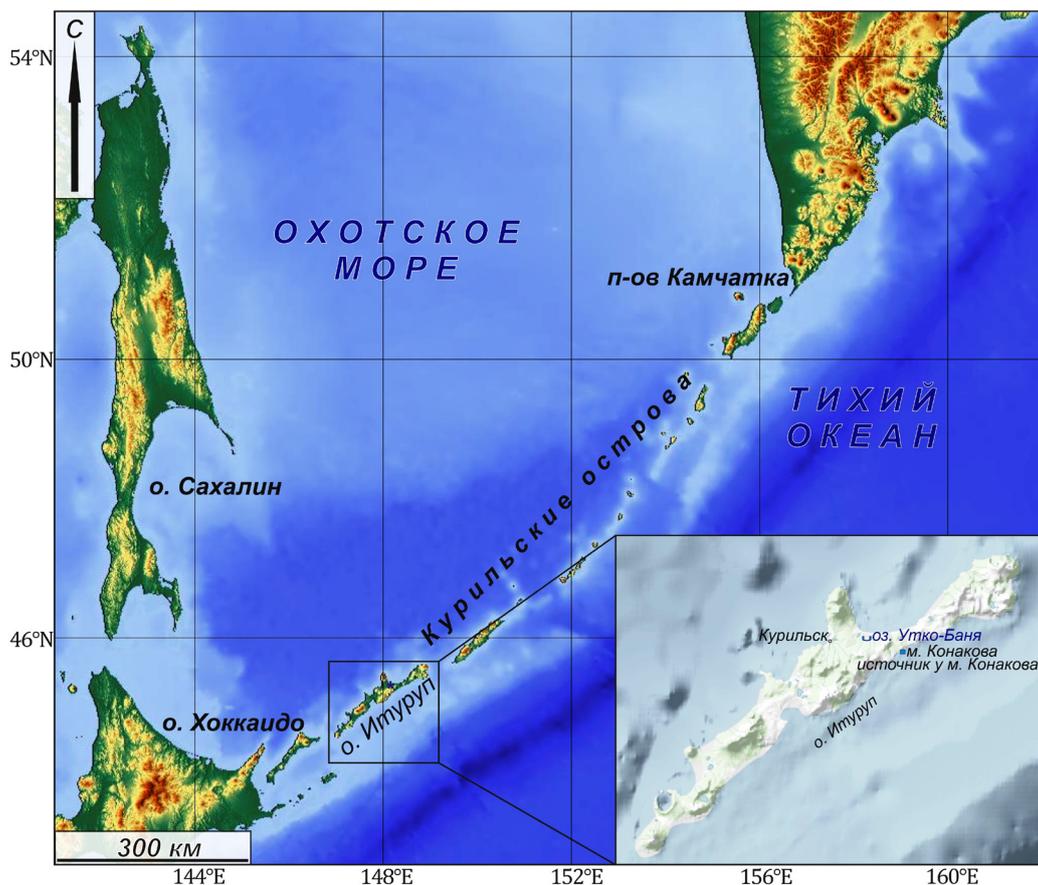


Рис. 2. Расположение района работ, оз. Утко-Баня и источника у мыса Конакова.
 Fig. 2. Location of the study area, Lake Utko-Banya and the spring at Konakova Cape.

Ландшафт района, в котором расположено озеро, представляет собой всхолмленную равнину с абсолютными отметками около 35–40 м. Озеро имеет крутые, сильно заросшие бамбучником и кедровым стлаником берега. Его форма в плане представляет собой овал 30 × 40 м, слегка вытянутый в восточно-северо-восточном направлении. Параметры водоема: площадь 900 м², длина береговой линии 115 м, максимальная глубина, зафиксированная при помощи эхолота, – 1.5 м. Вода озера имеет насыщенный бирюзовый цвет, местами наблюдается интенсивное выделение газов; ощущается запах сероводорода. По данным замеров, выполненных нами 17 февраля 2022 г. при помощи термомпары и тепловизора, температура озера составляла 15.9 °С (рис. 3), рН 3.5. На южном берегу озера, в 5 м от берега, расположены два источника, имеющие схожие с озерной водой температуру 14 °С и рН 3.5. Вполне вероятно, что озерная котловина представляет собой одноактную, в значительной мере эродированную, эксплозивную форму (воронку взрыва, или маар), однако

для подтверждения этого предположения нужны более детальные геолого-геоморфологические изыскания в летний период.

Также в ходе экспедиции были изучены термальное выходы, расположенные на тихоокеанском побережье перешейка Ветровой, в бухточке к югу от мыса Конакова [2, 4] (рис. 2). Источники разгружаются вдоль серии даек, простирающихся вдоль береговой линии: одна из них локализована в пределах подводно-берегового склона, а две другие – на границе уреза воды, отделяя пляж от океана (рис. 4). Температура грунта вдоль примыкающей к пляжу дайки составляла от 15 °С на поверхности до 40 °С на глубине ~40 см. Здесь же наблюдаются выходы термальных вод, температура которых варьирует от 25 до 38 °С. Впервые был изучен химический состав газогидротерм мыса Конакова. Предположительно, по своему составу они относятся к минеральным (11.7 г/л), нейтральным (рН 6.6), хлоридным натриевым водам, а ионные отношения в газогидротермах мыса Конакова

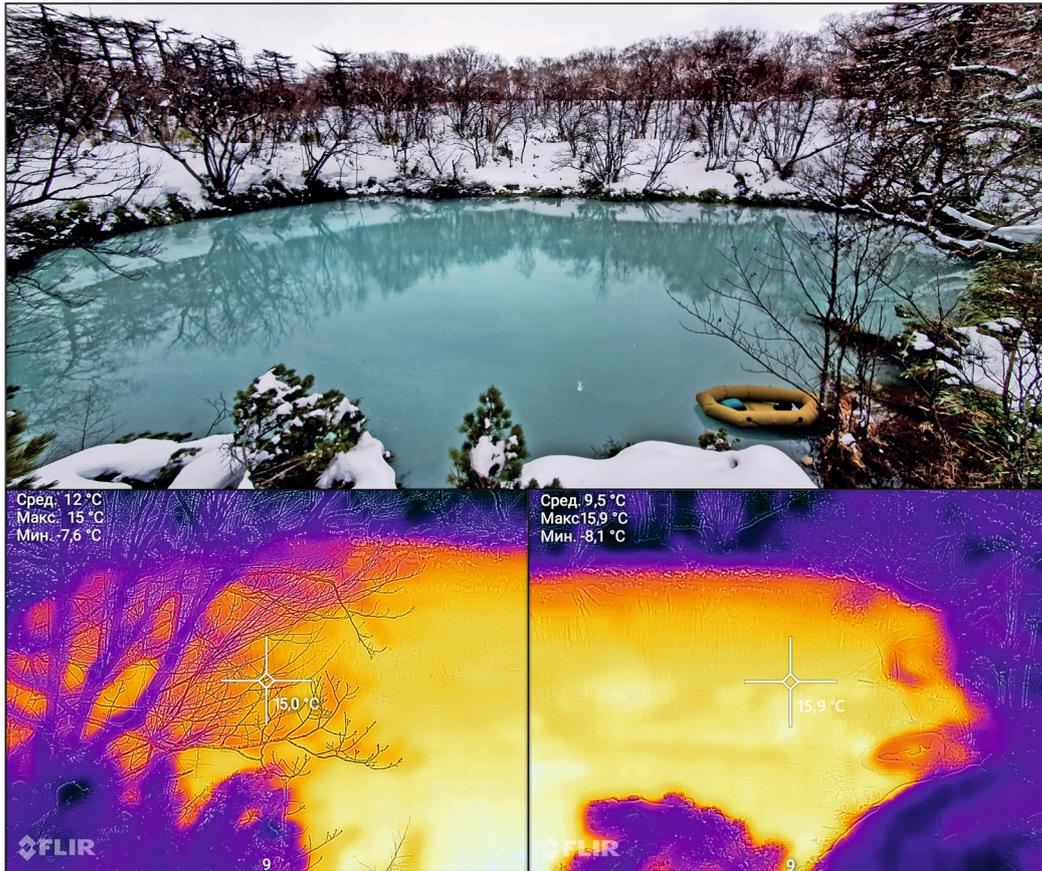


Рис. 3. Вид на оз. Утко-Баня с северного берега (верхний снимок) и термограмма озера, выполненная при помощи мобильного тепловизора (нижняя панель). Фото Д.Н. Козлова.

Fig. 3. View of Lake Utko-Banya from the northern shore (upper image) and a thermogram of the lake made using a mobile thermal imager (lower images). Photo by D.N. Kozlov.



Рис. 4. Дайки мыса Конакова (о. Итуруп, Курильские острова), 2022 г. Фото О.Р. Хубаевой.

Fig. 4. Dikes of Konakova Cape (Iturup Island, Kuril Islands), 2022. Photo by O.R. Hubaeva.

(Na/Cl 0.83; Ca/Mg 0.2; SO₄/Cl 0.1; Cl–Na/Mg 0.93; SO₄/SO₄+Cl 0.098) практически идентичны таковым для морских вод региона, что указывает на влияние морской воды или солевого состава морских осадков [2]. Полагаем, что по геохимическому облику наши гидротермы подобны термальным и минеральным источникам, нередко встречающимся в прибрежных районах Курильских островов (например, Водопадные и Башмачные термальные источники на о. Шиадокотан, Петушковские холодные минеральные источники и береговой холодный минеральный источник мыса Ключевой на о. Уруп [2]).

Предварительные результаты химического анализа газогидротерм приведены в таблице.

Таблица. Содержание элементов (ppb, мкг/л) вод, разгружающихся вдоль дайки мыса Конакова (о. Итуруп, Курильские острова)

Table. Content of elements (ppb, µg/l) of the waters discharged along the dike of Konakova Cape (Iturup Island, Kuril Islands)

| | | | | | |
|----|------------|----|---------|----|------|
| Li | 318.95 | Zn | 71.90 | Nd | 0.62 |
| Be | 0.15 | Ga | 0.00 | Sm | 0.54 |
| B | 3132.25 | Ge | 3.40 | Eu | 0.28 |
| Na | 4676513.27 | As | 44.14 | Gd | 0.28 |
| Mg | 390892.67 | Se | 40.40 | Tb | 0.37 |
| Al | 21.80 | Rb | 74.00 | Dy | 0.45 |
| Si | 60039.17 | Sr | 2537.33 | Ho | 0.42 |
| P | 93.26 | Y | 0.00 | Er | 0.60 |
| S | 306744.31 | Zr | 0.00 | Tm | 0.40 |
| Cl | 9132695.18 | Nb | 0.00 | Yb | 0.23 |
| K | 148523.15 | Mo | 19.99 | Lu | 0.64 |
| Ca | 166222.50 | Ag | 0.00 | Hf | 0.42 |
| Sc | 23.87 | Cd | 0.36 | Ta | 0.46 |
| Ti | 12.65 | Sn | 5.14 | W | 0.00 |
| V | 42.15 | Sb | 0.76 | Re | 0.51 |
| Cr | 1.46 | Te | 0.72 | Tl | 0.45 |
| Fe | 0.00 | Cs | 1.95 | Pb | 1.88 |
| Mn | 447.08 | Ba | 40.51 | Bi | 0.26 |
| Co | 0.67 | La | 0.10 | Th | 0.94 |
| Ni | 3.07 | Ce | 0.29 | U | 1.70 |
| Cu | 0.00 | Pr | 0.17 | | |

Примечание. Анализы выполнены в Центре коллективного пользования ЦКП «Микроанализ» при Лимнологическом институте СО РАН г. Иркутск. Исполнитель: к.г.-м.н. Степанова О.Г., лаборатория междисциплинарных эколого-экономических исследований и технологий.

Note. The analyzes were performed in the Center for collective use CCU "Microanalysis" at the Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk. Performer: O.G. Stepanova, Cand. Sci. (Geol. and Miner.), Laboratory of interdisciplinary environmental and economic research and technologies.

Таким образом, краткосрочные полевые работы 2022 г., направленные на изучение новых, ранее не рассмотренных в литературе газогидротермальных проявлений о. Итуруп, показали наличие в районе интересных и перспективных объектов для дальнейших исследований. Так, не отмеченное на существующих картах озеро Утко-Баня достойно, на наш взгляд, подробного изучения и в морфологическом, и в рекреационном аспекте. Остается открытым вопрос генезиса озерной котловины (эксплозивная воронка/маар?), решение которого требует проведения более детальных работ. Для газогидротермальных проявлений района мыса Конакова получены первые данные о химическом составе вод.

В настоящее время осуществляется обработка полученных данных: составление батиметрической схемы водоема, описание его характерных морфометрических параметров, интерпретация термограмм с тепловизора, ведутся аналитические работы, направленные на изучение особенностей химического состава и типовых характеристик вод.

Благодарности и финансирование. Авторы признательны за помощь в организации полевых работ и консультации жителям с. Рейдово и г. Курильск: Владимиру Васильевичу и Владимиру Владимировичу Тарико, Владимиру Владимировичу Ольховскому, Виктору Аркадьевичу Стрельцову и Герману Сергеевичу Васюхино. Выражаем отдельную благодарность за экспертную консультацию Рафаэлю Владимировичу Жаркову (ИМГиГ ДВО РАН).

Исследования проводились в рамках проекта Российского научного фонда (№ 21-17-00049 «Изучение вулканической, сейсмической и цунами опасности, а также оценка геотермальных ресурсов для развивающихся территорий Курильских островов»; руководитель акад. Е.И. Гордеев), в соответствии с планом НИР лаборатории вулканологии и вулканопасности ИМГиГ ДВО РАН (№ 121030100168-3; рук. А.В. Дегтерев).

Список литературы

1. Горшков Г.С. 1967. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 288 с.
2. Мархинин Е.К., Стратула Д.С. 1977. *Гидротермы Курильских островов*. М.: Наука, 212 с.
3. Жарков Р.В. 2014. *Термальные источники Южных Курильских островов*. Владивосток: Дальнаука, 378 с.
4. Калачева Е.Г. 2021. Экспедиционные исследования Курильских островов в 2021 г. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 3(51): 101–110. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-3-51-101-110>

5. Козлов Д.Н. 2015. *Кратерные озера Курильских островов*. Южно-Сахалинск: Сахалин. обл. краеведч. музей; Ин-т морской геологии и геофизики ДВО РАН, 112 с.

References

1. Gorshkov G.S. 1967. [*Volcanism of the Kuril island arc*]. Moscow: Nauka Publ., 287 p. (In Russ.).
 2. Markhinin E.K., Stratula D.S. 1977. [*Hydrotherms of the Kuril Islands*]. Moscow: Nauka, 212 p. (In Russ.).

3. Zharkov R.V. 2014. [*Thermal springs of the Southern Kuril Islands*]. Vladivostok: Dal'nauka, 378 p. (In Russ.).

4. Kalacheva E.G. 2021. Expedition studies of the Kuril Islands in 2021. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*, 3(51): 101–110. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-3-51-101-110>

5. Kozlov D.N. 2015. [*Crater lakes of the Kuril Islands*]. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin. obl. kraevedch. muzey; In-morskoy geologii i geofiziki DVO RAN, 112 p. (In Russ.).

Об авторах

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

Козлов Дмитрий Николаевич (<https://orcid.org/0000-0002-8640-086X>), кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, kozlovdn@bk.ru

Хубаева Ольга Руслановна (<https://orcid.org/0000-0002-0145-0981>), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамики и строения вулканических систем, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, grifon03@yandex.ru

Хомчановский Антон Леонидович (<https://orcid.org/0000-0001-8573-5062>), кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории активной тектоники и палеосейсмологии, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, khomscience@mail.ru

Поступила 12.05.2022
 После доработки 28.05.2022
 Принята к печати 03.06.2022

About the Authors

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

Kozlov, Dmitrii N. (<https://orcid.org/0000-0002-8640-086X>), Cand. of Sci. (Geography), Senior Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, kozlovdn@bk.ru

Khubaeva, Olga R. (<https://orcid.org/0000-0002-8640-086X>) Cand. Sci. (Geology and mineralogy), Senior Researcher, Laboratory of dynamics and structure of volcanic systems, Institute of Volcanology and Seismology of the Far East Branch of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, grifon03@yandex.ru

Khomchanovskiy, Anton L. (<https://orcid.org/0000-0001-8573-5062>), Cand. Sci. (Geography), Researcher of the Laboratory of active tectonics and paleoseismology, Institute of Volcanology and Seismology of the Far East Branch of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, khomscience@mail.ru

Received 12 May 2022
 Revised 28 May 2022
 Accepted 3 June 2022

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



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

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 577.118:543.421:597.552.3(265.546)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.136-140>
<https://www.elibrary.ru/ipdmhb>

Содержание микроэлементов в дальневосточной мойве *Mallotus catervarius* (Pisces: Osmeridae) из прибрежных вод юго-западной части о. Сахалин

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

*E-mail: y.poltev@sakhniro.ru

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

Реферат. Проведена оценка содержания Fe, As, Cu, Mn, Cr, Ni, Pb, Hg и Cd в мышцах и гонадах дальневосточной мойвы, отобранной в 2020 г. в прибрежных водах юго-западной части о. Сахалин. Наибольшее содержание As отмечается в мышцах, Mn – в икре, Hg – в мышцах и молоках. Содержание микроэлементов в мышцах и гонадах рыб снижается в ряду Fe – Cd или Hg. Концентрации нормируемых токсичных элементов Pb, Cd, As и Hg в гонадах и мышцах мойвы являются безопасными по гигиеническим требованиям к пищевым продуктам. Полученные данные косвенно свидетельствуют о благоприятной экологической обстановке относительно содержания нормируемых токсичных элементов в водах у юго-западного Сахалина.

Ключевые слова: микроэлементы, атомная абсорбция, дальневосточная мойва, мышцы, гонады, Татарский пролив

The content of trace elements in the Pacific capelin *Mallotus catervarius* (Pisces: Osmeridae) from the coastal waters of the southwestern part of Sakhalin Island

Yuriy N. Poltev*, Tatyana G. Koreneva, Vsevolod V. Maryzhikhin, Irina V. Syrbu

*E-mail: y.poltev@sakhniro.ru

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

Abstract. The content of Fe, As, Cu, Mn, Cr, Ni, Pb, Hg and Cd in the muscles and gonads of the Pacific capelin sampled in 2020 in the coastal waters of the southwestern part of Sakhalin Island was estimated. The highest content of As is noted in muscles, Mn – in fish eggs, Hg – in muscles and milt. The content of trace elements in fish muscles and gonads decreases in the range Fe – Cd or Hg. The concentrations of normalized toxic elements Pb, Cd, As and Hg in the muscles and gonads of the Pacific capelin are safe according to hygienic requirements for food products. The data obtained indirectly indicate a favorable ecological situation in terms of the content of normalized toxic elements in the waters near southwest Sakhalin.

Keywords: trace elements, atomic absorption, Pacific capelin, muscles, gonads, Tatar Strait

Для цитирования: Полтев Ю.Н., Коренева Т.Г., Марыжихин В.Е., Сырбу И.В. Содержание микроэлементов в дальневосточной мойве *Mallotus catervarius* (Pisces: Osmeridae) из прибрежных вод юго-западной части о. Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 2, с. 136–140. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.136-140>; <https://www.elibrary.ru/ipdmhb>

For citation: Poltev Yu.N., Koreneva T.G., Maryzhikhin V.E., Syrbu I.V. The content of trace elements in the Pacific capelin *Mallotus catervarius* (Pisces: Osmeridae) from the coastal waters of the southwestern part of Sakhalin Island. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 136–140. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.136-140>; <https://www.elibrary.ru/ipdmhb>

Благодарности и финансирование

Авторы благодарят ведущего специалиста лаборатории аквакультуры беспозвоночных и водорослей Сахалинского филиала ВНИРО (СахНИРО) В.А. Сергеенко за отбор дальневосточной мойвы. Авторы признательны рецензентам за конструктивные замечания, способствующие улучшению данного сообщения, и ценные советы относительно методики будущих исследований по теме.

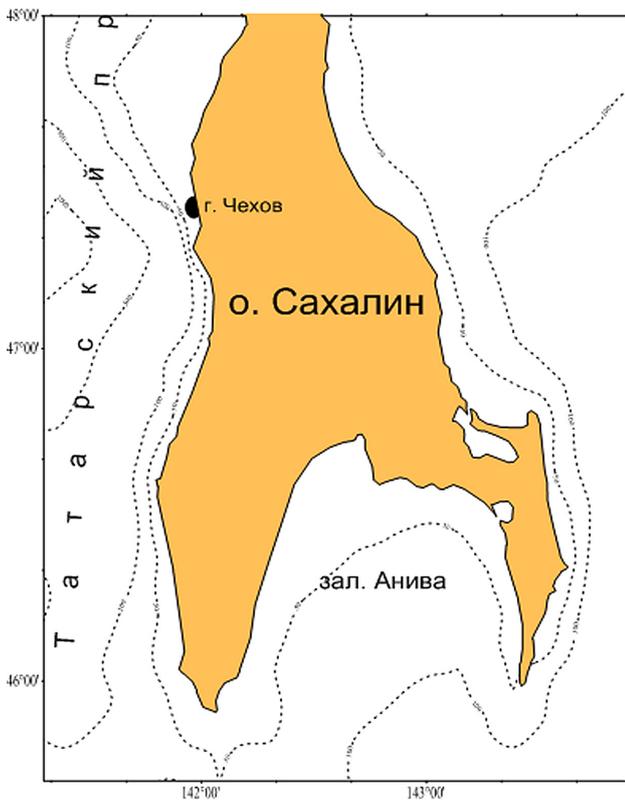
Acknowledgements and Funding

Authors are grateful to leading specialist of the laboratory of aquaculture of invertebrates and algae of the Sakhalin Branch of VNIRO (SakhNIRO) V.A. Sergeenko for sampling of the Pacific capelin. Authors thank the Reviewers for constructive comments that help improve this report and for valuable advices on the methodology future research on the topic.

Введение

Негативной стороной научно-технического прогресса является загрязнение окружающей среды различными поллютантами, из которых наиболее токсичными считаются тяжелые металлы. Попадая в водоемы и водотоки суши, а также в прибрежные участки морей и океанов, они аккумулируются в гидробионтах, использование которых человеком в пищу может негативно отразиться на его здоровье. В связи с этим проблема безопасности продуктов питания морского происхождения является актуальной [1].

Дальневосточная мойва, массово подходящая в последние годы к берегам о. Сахалин для нереста и, соответственно, используемая местным населением для питания, ранее на содержание микроэлементов не изучалась. Цель нашей работы – выявить уровни содержания и особенности распределения микроэлементов, в том числе токсичных нормируемых (Pb, Cd, As и Hg), в мышцах и гонадах дальневосточной мойвы из прибрежных вод юго-западной части острова о. Сахалин, а также дать санитарно-гигиеническую оценку их качества.



Место отбора дальневосточной мойвы.
Place of sampling of the Pacific capelin.

Материалом для настоящего исследования служили мышцы и гонады дальневосточной мойвы *Mallotus catervarius* (Pennant, 1784), отобранной 25 апреля 2020 г. у г. Чехов (о. Сахалин) в районе с координатами 47°25'47" с.ш. и 141°58'00" в.д. (см. карту-схему). Отлов рыбы проводили с использованием сачка в период ее массового нереста в прибойной полосе. Среднюю пробу для мышц самок отобрали из 15 особей, икры – из 13, молок – из 10. Пробы хранили в морозильной камере при температуре –20°C.

У рыб измеряли длину по Смитсу (от вершины рыла до конца средних лучей хвостового плавника, *FL*).

Для минерализации из проб отбирали навеску 1 г с точностью до 0.01 г. Для определения Hg в тканях использовали «закрытый» способ разложения навесок смесью кислот (серной и азотной) и перманганата калия [2]. Определение Fe, Pb, Cd, Cu, Cr, Mn, Ni и As проводили способом «мокрой» минерализации в микроволновой печи [3]. Концентрацию Pb, Cd, Cu, Cr, Mn, Ni и As определяли атомно-абсорбционным методом в режиме электротермической атомизации (GFAA) на спектрофотометре Shimadzu AA-6800 с графитовой печью и коррекцией фона на основе эффекта Зеемана. Концентрации Fe измеряли этим же методом, но в пламенном режиме с дейтериевой коррекцией фона (FLAA). Содержание Hg определяли методом «холодного пара» (CVAA) с использованием приставки MVU-1A к спектрофотометру AA-6800. Точность измерений составила 20 % для Fe и Hg, 25 % – для Pb и Cu, 26 % – для Cd, 32 % для As и Mn, 34 % – для Cr, 36 % – для Ni [3]. Для градуировки спектрофотометра и контроля точности результатов измерений применяли стандартные образцы утвержденного типа – ГСО 7330-96 состава раствора ионов металлов (Fe, Cd, Mn, Cu, Ni и Pb), ГСО 7264-96 состава раствора ионов As(III), ГСО 7781-2000 состава раствора ионов Cr(VI), ГСО 8004-93 состава водного раствора ионов Hg.

Результаты и обсуждение

Дальневосточная мойва *Mallotus catervarius* (Pennant, 1784) – морской, солоноватоводный, неритический вид, характеризующийся коротким жизненным циклом и значительной флюктуацией численности [4]. У восточного побережья России встречается от северной час-

ти Японского до южной части Чукотского моря [5–7]. У азиатского побережья икрометание происходит в верхней части литорали, в приливо-отливной зоне [8]. У берегов Сахалина и Приморья она нерестится на глубине не более 1–2 м [7, 9, 10]. Сезонные миграции ограничиваются смещением скоплений весной из мористых в прибрежные районы, а осенью – в обратном направлении [7, 11, 12].

Длина *FL* исследованных рыб варьировала в пределах от 14.5 до 17.2 см, составив в среднем 16.1 ± 0.12 см, масса тела – от 20 до 32 г (25.0 ± 0.7 г). На особей с *FL* 15.6–16.5 см пришлось 64.0 %. Соотношение самок к самцам 1/0.67. У самок отмечались нерестящиеся (86.7 %) и отнерестившиеся (13.4 %) особи, у самцов – отнерестившиеся. У всех рыб желудки были пустыми. Содержание нормируемых токсичных элементов в мышцах¹, икре и молоках представлено в табл. 1.

Содержание микроэлементов в мышцах самок и гонадах дальневосточной мойвы снижается в ряду железо – кадмий или ртуть. Ряды последовательностей, расположенных в порядке уменьшения концентрации микроэлементов, имеют вид:

$Fe \gg Mn \geq Cu \geq As > Cr > Ni > Pb \geq Hg \gg Cd$ (мышцы);

$Fe \gg Mn \geq Cu > Cr \gg Ni > Pb > As \gg Cd \geq Hg$ (икра);

$Fe \gg Mn \geq Cu > Cr > Ni \gg Pb > As > Hg \gg Cd$ (молоки).

Из них наиболее близки последовательности для икры и молок – различие только в положении Cd и Hg. Более сильное различие (положение Cr, Ni, Pb и As) отмечается для последовательностей мышц самок и молок, наибольшее различие – для последовательностей

мышц самок и икры (положение Cr, Ni, Pb, As, Cd и Hg). Общим для этих трех рядов является значительное доминирование содержания Fe в тканях и органах по сравнению с другими элементами, а также схожесть в положении Fe, Mn и Cu, занимающих в них три первые позиции.

Результаты исследований показывают, что различия концентраций микроэлементов в рассматриваемых тканях невелики и находятся в пределах одного порядка. Исключение составляет As, содержание которого в мышцах на порядок выше, чем в икре и молоках. Распределение микроэлементов в тканях имеет свои особенности. Максимальное содержание As приходится на мышцы, Mn – на икру, Hg – на мышцы и молоки.

Допустимые уровни содержания токсичных элементов в мышечных тканях морских рыб в мг/кг сырой массы составляют: Pb – 1.0; As – 5.0; Cd – 0.2; Hg – 0.5; в икре и молоках: Pb, Cd, As – 1.0, Hg – 0.2 (табл. 2). Согласно полученным данным, концентрации нормируемых элементов в исследованных образцах ниже допустимых уровней (табл. 2). Такие же данные получены и для мойвы *Mallotus villosus* из Баренцева моря [13]. Следует отметить, что в мышцах тихоокеанской мойвы выше концентрации Pb, а баренцевоморской – As, Cd и Hg, при этом содержание Cd у нее выше на порядок.

Таким образом, определены средние концентрации микроэлементов в мойве, отобранной в прибрежных водах у юго-западного побережья о. Сахалин в период ее массового нереста. Выявлены особенности распределения элементов в мышцах и гонадах рыб. В мышцах обнаружены максимальные количества мышьяка, содержания которого на порядок выше, чем в икре и молоках.

Таблица 1. Средние концентрации микроэлементов в мышцах и гонадах дальневосточной мойвы из прибрежных вод юго-западного Сахалина

Table 1. Average concentrations of trace elements in muscles and gonads of the Pacific capelin from the coastal waters of southwest Sakhalin

| Ткани | Микроэлементы, мг/кг сыр. массы | | | | | | | | |
|--------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | Fe | Mn | Cu | As | Cr | Ni | Pb | Hg | Cd |
| Мышцы | 3.74 | 0.54 | 0.48 | 0.35 | 0.23 | 0.09 | 0.02 | 0.016 | 0.005 |
| Икра | 3.09 | 0.86 | 0.59 | 0.03 | 0.25 | 0.09 | 0.04 | 0.004 | 0.005 |
| Молоки | 2.46 | 0.46 | 0.42 | 0.02 | 0.24 | 0.11 | 0.04 | 0.016 | 0.003 |

¹ По техническим причинам анализ на содержание микроэлементов в мышцах пришлось ограничить анализом мышц самок.

Таблица 2. Средние концентрации нормируемых токсичных элементов в икре, молоках и мышцах дальневосточной мойвы из прибрежных вод юго-западного Сахалина и мышцах атлантической мойвы из Баренцева моря

Table 2. Average concentrations of normalized toxic elements in fish eggs, milt and muscles of the Pacific capelin from the coastal waters of southwest Sakhalin and muscles of the Atlantic capelin from the Barents Sea

| Вид, ткани (органы) | Нормируемые токсичные элементы, мг/кг сыр. массы | | | |
|--|--|------|-------|-------|
| | As | Pb | Hg | Cd |
| <i>Mallotus catervarius</i> (Татарский пролив) | | | | |
| Икра | 0.03 | 0.04 | 0.004 | 0.005 |
| Молоки | 0.02 | 0.04 | 0.016 | 0.003 |
| Мышцы | 0.35 | 0.02 | 0.016 | 0.005 |
| <i>Mallotus villosus</i> (Баренцево море) | | | | |
| Мышцы [13] | 2.71 | 0.09 | 0.019 | 0.075 |
| Допустимые уровни ² | | | | |
| Икра, молоки | 1.0 | 1.0 | 0.2 | 1.0 |
| Мышцы | 5.0 | 1.0 | 0.5 | 0.2 |

Концентрации нормируемых токсичных элементов (Pb, Cd, As и Hg) в мойве ниже регламентируемых уровней, она является безопасной по гигиеническим требованиям к пищевым продуктам. Полученные данные косвенно указывают на благоприятную экологическую обстановку в водах района обитания мойвы.

В перспективе планируется исследовать микроэлементный состав дальневосточной мойвы из других районов присахалинских вод, в частности из зал. Анива и юго-восточной части острова, для сравнения условий обитания.

Список литературы

1. Донец М.М., Цыганков В.Ю. 2019. Современные уровни загрязняющих веществ в промысловых объектах дальневосточных морей России. *Вестник ДВО РАН*, 4: 90–103. <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.206.4.010>
2. МУК 4.1.1472-03. Атомно-абсорбционное определение массовой концентрации ртути в биоматериалах животного и растительного происхождения (пищевых продуктах, кормах и др.). 2003. Доступ из ИИС «Техэксперт». <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293830/4293830517.htm> (дата обращения 04.06.2022).
3. Методика количественного химического анализа. Определение As, Pb, Cd, Sn, Cr, Cu, Fe, Mn и Ni в пробах пищевых продуктов и пищевого сырья атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией. 2009. № М-02-1009-08. Аттест. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Свид-во № 242/43-09 от 08.07.2009. ООО «Аналит», 21 с.
4. Ихтиофауна залива Анива (остров Сахалин, Охотское море). 2020. Авт.: Ю.В. Дылдин, А.М. Орлов, А.Я. Великанов и др. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 396 с. https://doi.org/10.31677/isbn978_5_94477_271_8
5. Андрияшев А.П. 1954. Рыбы северных морей СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 566 с.
6. Румянцев А.И. 1955. Мойва, уёк (*Mallotus villosus socialis*, Pallas). *Тр. ИО АН СССР*, 14: 41–43.
7. Великанов А.Я. 1986. Тихоокеанская мойва. В кн.: *Биологические ресурсы Тихого океана*. М.: Наука, с. 135–145.
8. Великанов А.Я. 2018. Дальневосточная мойва: Распределение, особенности биологии, динамика биомассы, проблемы и перспективы промыслового освоения. *Вопросы рыболовства*, 19(3): 300–326.
9. Румянцев А.И. 1946. Мойва Японского моря. *Известия ТИНРО*, 22: 35–74.
10. Великанов А.Я. 1984. К экологии размножения дальневосточной мойвы *Mallotus villosus socialis* у берегов острова Сахалин. *Вопросы ихтиологии*, 24(3): 425–430.
11. Великанов А.Я. 1986. Сезонные особенности распределения мойвы в шельфовых водах Сахалина. *Рыбное хозяйство*, 12: 24–26.
12. Савин А.Б. 2001. Динамика основных биологических показателей дальневосточной мойвы *Mallotus villosus catervarius* (Osmeridae) в ее зимовальных, преднерестовых и посленерестовых скоплениях у западной Камчатки. *Вопросы ихтиологии*, 41(5): 620–630.
13. Лаптева А.М. 2016. Тяжелые металлы и микроэлементы в баренцевоморских рыбах различных экологических групп. В кн.: *IV Балтийский морской форум: Междунар. науч. конф. «Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов»*: Труды. Калининград: Калининград. гос. техн. ун-т, с. 37–40.

References

1. Donets M.M., Tsygankov V.Yu. 2019. Current levels of pollutants in commercial hydrobionts of the Russian Far Eastern seas. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 4: 90–103. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.206.4.010>
2. МУК 4.1.1472-03. Atomic absorption determination of mass concentration of mercury in animal and plant origin biomaterials (alimentary products, feed, etc.). Available from IRS Techexpert. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293830/4293830517.htm> (accessed 04.06.2022). (In Russ.).

² СанПиН 2.3.2.1078-01. 2002. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. М.: Госкомсанэпиднадзор, 156 с.

3. *Method of quantitative chemical analysis. Determination of As, Pb, Cd, Sn, Cr, Cu, Fe, Mn and Ni in the samples of food products and food raw materials by atomic absorption method with electrothermal atomization no. M-02-1009-08. 2009.* Certified by the D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology (VNIIM). Certification no. 242/43-09 from 08.07.2009. Analit Ltd., 21 p. (In Russ.).
4. *Ichthyofauna of the Aniva Bay (the Sakhalin Island, the Sea of Okhotsk). 2020.* Authors: Yu.V. Dylidin, A.M. Orlov, A.Ya. Velikanov et al. Novosibirsk State Agricultural University. Novosibirsk: ITS NGAU «Zolotoy kolos»: 396 p. (In Russ.). https://doi.org/10.31677/isbn978_5_94477_271_8
5. Andriyashev A.P. **1954.** *Ryby severnykh morey SSSR [Fishes of the northern seas of the USSR]*. Moscow; Leningrad: Izdvo AN SSSR, 566 p. (In Russ.).
6. Rumyantsev A.I. **1955.** *Moyva, uyok (Mallotus villosus socialis, Pallas). Tr. IO AN SSSR, 14: 41–43.* (In Russ.).
7. Velikanov A.Ya. **1986.** [Pacific capelin]. In: *[Biological resources of the Pacific Ocean]*. Moscow: Nauka, p. 135–145. (In Russ.).
8. Velikanov A.Ya. **2018.** Pacific capelin: Distribution, peculiarities of biology, biomass dynamics, problems and perspectives of its fisheries. *Problems of Fisheries*, 19(3): 300–326. (In Russ., abstr. in Engl.). http://www.vniro.ru/files/voproxy_rybolovstva/archive/vr_2018_t19_3_article_3.pdf
9. Rumyantsev A.I. **1946.** [Capelin of the Sea of Japan]. *Izvestiya TINRO*, 22: 35–74. (In Russ.).
10. Velikanov A.Ya. **1984.** Ecology of reproduction of the far-eastern capelin, *Mallotus villosus socialis* (Osmeridae), along the coasts of Sakhalin. *J. of Ichthyology*, 24(3): 43–48.
11. Velikanov A.Ya. **1986.** [Seasonal features of capelin distribution in the shelf waters of Sakhalin]. *Fisheries*, 12: 24–26. (In Russ.).
12. Savin A.B. **2001.** Dynamics of main biological indices of capelin *Mallotus villosus catervarius* (Osmeridae) in its wintering prespawning and postspawning aggregations off western Kamchatka. *J. of Ichthyology*, 41(8): 589–599.
13. Lapteva A.M. **2016.** Heavy metals and trace elements in the Barents Sea fishes of different ecological groups. In: *IV Baltic Maritime Forum: Intern. scientific conf. "Aquatic bioresources, aquaculture and ecology of reservoirs"*: Proceedings. Kaliningrad: Kaliningrad State Techn. Univ., p. 37–40. (In Russ.).

Об авторах

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

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

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

Марыжихин Всеволод Евгеньевич, специалист

Сырбу Ирина Викторовна, ведущий инженер

About the Authors

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

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

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

Maryzhikhin, Vsevolod E., Specialist

Syrbu, Irina V., Leading Engineer

Поступила в редакцию 15.05.2022

После рецензирования 09.06.2022

Принята к публикации 10.06.2022

Received 10 May 2022

Revised 09 June 2022

Accepted 10 June 2022

На печатную версию журнала «Геосистемы переходных зон» на 2022 год можно оформить подписку на сайте Объединенного каталога "Пресса России" www.pressa-rf.ru и через интернет-магазин «Пресса по подписке» (<https://www.akc.ru>) (подписной индекс 80882), а также с 1 сентября 2022 г. по электронному каталогу Почты России (индекс ПС539)

You can subscribe to the printed version of the «Geosystems of transition zones» journal for 2022 on the website of the United Catalogue "Press of Russia" (www.pressa-rf.ru) and in the online store "Press on subscription" (<https://www.akc.ru>) (subscription index 80882), as well as since 1 September 2022 on the electronic catalog of the Russian Post (index ПС539)

