

Научный журнал

Учредитель и издатель:

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Издается с января 2017 г.

Периодичность издания 4 раза в год

Scientific journal

Founder and Publisher:

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

Published since January 2017

Periodicity: Quarterly

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

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

Журнал:

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

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

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

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

1.6.14. Геоморфология и палеогеография (*географические*)

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

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

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

1.5.15. Экология (*биологические*)

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

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

The Journal is:

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

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

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

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

1.6.14. Geomorphology and Paleogeography (*Geography*)

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

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

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

1.5.15. Ecology (*Biology*)

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

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

Адрес учредителя и издателя

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

Postal address

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

© ИМГиГ ДВО РАН, 2024

Редакционная коллегия*Главный редактор*

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

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

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

Editorial Board*Editor-in-Chief*

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Executive Secretary

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

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

Редакционная коллегия

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

Editorial Board

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

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

Переводчик Чера Анастасия Дмитриевна

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

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

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 9.4.
Тираж 150 экз. Заказ 8049. Свободная цена.
Дата выхода в свет 27.06.2024.

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

Translator Anastasiya D. Chera

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

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

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 9.4.
Number of copies 150. Order no. 8049. Free price.
Date of publishing 27.06.2024.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Геофизика, сейсмология

Д.А. Сафонов, Е.П. Семенова. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2023 году 77

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

А.С. Закупин, Н.С. Стовбун, С.А. Гуляков, А.И. Казаков, И.П. Дудченко. Проявления геомагнитной активности (солнечные вспышки и магнитные бури) в изменении электротеллурических потенциалов по данным измерений на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне 91

Общая и региональная геология.

Геотектоника и геодинамика

А.А. Верхотуров. Стратиграфическая привязка крупнообломочного материала из отложений Южно-Сахалинского грязевого вулкана 104

Океанология

И.В. Шумилов, И.Г. Минервин, В.М. Пищальник, В.А. Романюк. Экспериментальная модель внутрисезонного хода ледовитости Охотского моря 114

Геоморфология и палеогеография

Е.О. Мухаметшина. Субфосильные спорово-пыльцевые спектры горных территорий на примере полуострова Камчатка 127

Экология. Геоморфология и палеогеография

Л.М. Мохова. Особенности формирования субфосильных спорово-пыльцевых спектров острова Кетой (Центральные Курилы) 142

Хроника научной жизни

КОНФЕРЕНЦИИ

V Всероссийская научная конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы» (Южно-Сахалинск, 2024) 153

Geophysics. Seismology

D.A. Safonov, E.P. Semenova. Seismicity of the south of the Russian Far East in 2023 77

SHORT REPORT

A.S. Zakupin, N.S. Stovbun, S.A. Gulyakov, A.I. Kazakov, I.P. Dudchenko. The manifestations of geomagnetic activity (solar flares and magnetic storms) in the change of electrostatic potentials according to measurements at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site (In English: <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2024-2-2.pdf>)... 91

General and regional geology.

Geotectonics and geodynamics

A.A. Verkhoturlov. Stratigraphic control of large detrital rocks of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano 104

Oceanology

I.V. Shumilov, I.G. Minervin, V.M. Pishchalnik, V.A. Romanyuk. Experimental model of intraseasonal variability of ice area in the Sea of Okhotsk 114

Geomorphology and Paleogeography

E.O. Mukhametshina. Subfossil spore-pollen spectra of mountainous areas: the case of the Kamchatka Peninsula 127

Ecology. Geomorphology and Paleogeography

L.M. Mokhova. Special aspects of the formation of subfossil pollen assemblages from Katoi Island (Central Kuril Islands) 142

Current scientific events

CONFERENCES

V Russian scientific conference with foreign participants “Geodynamical Processes and Natural Hazards” (Yuzhno-Sakhalinsk, 2024) 153

© Авторы 2024 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2024. 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.2024.8.2.077-090>
<https://www.elibrary.ru/vlppqc>

Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2023 году

Д. А. Сафонов^{@1}, Е. П. Семенова²

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

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

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

Резюме. В работе представлен обзор сейсмичности южной части Дальнего Востока России в 2023 г., основанный на данных каталога регионального информационно-обрабатывающего центра «Южно-Сахалинск» Сахалинского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». Приведены основные параметры сейсмичности: карты эпицентров землетрясений и их макросейсмических проявлений, статистическая оценка уровня сейсмичности СОУС'09, графики Бенъофа, карты плотности условной упругой деформации в 2023 г. в сравнении с предыдущим более длительным временным интервалом. Дан краткий анализ наиболее значимых и интересных для детального изучения землетрясений. Сейсмичность Курило-Охотского, Сахалинского регионов и региона Приамурье и Приморье в течение года оставалась умеренной, в пределах фоновых значений. Наиболее сильное землетрясение с $M_w = 6.4$ произошло в южной части Курильской островной дуги.

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

Seismicity of the south of the Russian Far East in 2023

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

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

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

² Sakhalin Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The paper presents an overview of the seismicity of the southern part of the Russian Far East in 2023 based on the data from the catalog of the "Yuzhno-Sakhalinsk" Regional Information Processing Center (RIPC) of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences" (SB FRC UGS RAS). The main parameters of seismicity, such as maps of earthquake epicenters and their macroseismic events, the statistical estimation of the seismicity level (SESL'09), Benioff graphs, and density maps of nominal elastic deformation in 2023 in comparison with the previous longer time interval, are given. A brief analysis of the most significant and interesting earthquakes for detailed study is given. The seismicity of the Kuril-Okhotsk, Sakhalin, and Amur and Primorye regions remained moderate during the year, within the background values. The strongest earthquake with $M_w = 6.4$ occurred in the southern part of the Kuril Island arc.

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 2023 году. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 2, с. 77–90. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.2.077-090>; <https://www.elibrary.ru/vlppqc>

For citation: Safonov D.A., Semenova E.P. Seismicity of the south of the Russian Far East in 2023. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 2, pp. 77–90. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.2.077-090>; <https://www.elibrary.ru/vlppqc>

Финансирование и благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного финансирования Министерства науки и высшего образования Российской Федерации с использованием

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of state funding of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation using the data obtained with large-

данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>). Авторы благодарят уважаемых рецензентов за детальный анализ работы и полезные замечания.

Введение

Статья продолжает ежегодные обзоры [1] сейсмичности территории юга Дальнего Востока России на основе оперативных данных Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН). Как и в предыдущей статье, для исследования использовалась выборка из базы данных землетрясений регионального информационно-обрабатывающего центра (РИОЦ) «Южно-Сахалинск».

Каталог РИОЦ «Южно-Сахалинск» содержит основные параметры зарегистрированных землетрясений, обработанных в оперативном режиме. В качестве основной энергетической характеристики принимается региональная магнитуда $ML (M_{wa})$ [2].

Цель работы – оценить сейсмичность южной части Дальнего Востока РФ по предварительным данным, полученным в оперативном режиме. Основной акцент в статье сделан на наиболее сильных по магнитуде и макросейсмическому эффекту землетрясениях, детальные данные по которым станут доступны после окончательной обработки в течение 2024 г.

Обзор сейсмичности выполнен с использованием основных характеристик: статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09, графиков Беньофа. Для демонстрации пространственного распределения сейсмичности приведены карты эпицентров и плотности условной упругой деформации.

Исходные данные

К концу 2023 г. сеть сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН (международный код сети – SAGSR) официально состояла из 46 пунктов непрерывных наблюдений, 37 из которых – стационарные и 9 – автономные короткопериодные полевых наблюдений на юге

scale research facilities «Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolitozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories, and the world» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

The authors thank the respected Reviewers for their detailed analysis of the paper and helpful comments.

о. Сахалин, это на один пункт наблюдений меньше, чем в прошлом году [1] (рис. 1, 2).

В 2023 г. по разным причинам была остановлена работа пунктов сейсмологических наблюдений «Невельск» (NEV), «Новоалександровск» (NVA) на юге о. Сахалин, «Краснополье» (UGL2) в центральной части острова, а также один из комплектов широкополосной аппаратуры станции «Южно-Сахалинск» (SSH). Возобновление работы указанных пунктов не планируется.

Кроме того, в законсервированном состоянии находятся сейсмические станции «Вал» (VAL), «Новиково» (NOV) на о. Сахалин, «Головнино» (GLVR), «Плато» (SK2) на Курильских островах и «Экимчан» (EKMR) в Приамурье (рис. 1, 2).

Для обеспечения сейсмического мониторинга в режиме реального времени на западном побережье юга Сахалина 24 октября 2023 г. был введен в эксплуатацию пункт наблюдения «Колхозное» (ККН), организованный на базе автономной станции сети полевых наблюдений. Установка данной станции призвана компенсировать остановку станции «Невельск» (NEV), а также входит в процесс запланированной интеграции станций полевых наблюдений в единую систему сбора сейсмологических данных филиала.

Мониторинг сейсмичности на территории Приамурья проводится преимущественно сейсмическими станциями «Зейского узла»: «Зея» (ZEA), «Бомнак» (BMKR), «Кировский» (KROS) и «Октябрьский» (ОТВ). С 2021 г. последние три станции оборудованы российскими сейсмографами ZETLAB ZET 7152-N VER.3 со встроенным короткопериодным велосиметром. В связи с отсутствием стабильных каналов передачи данных в Амурской области станции наблюдений «Бомнак», «Кировский» и «Октябрьский» были переведены в

режим работы без передачи данных в реальном времени. Данные этих трех станций сохраняются на встроенном накопителе регистратора и передаются ежемесячно в ИОЦ «Зея» для последующей обработки. Станция «Зея» производит регистрацию сейсмических сигналов регистрирующим комплексом Datamark на базе широкополосного высокочувствительного сейсмометра STS-2. К обработке материалов наблюдений привлекались данные сейсмической станции «Кульдур» (KLR), «Николаевск-на-Амуре» (NKL) и других станций региональной сети. Оперативное определение эпицентров сейсмических событий в регионе Приморье и Приамурье контролируется РИОЦ «Южно-Сахалинск». К моменту написания статьи обработка землетрясений этой территории, произошедших в 2023 г., была завершена и внесена в базу РИОЦ, что позволило включить в анализ региональной сейсмичности более 200 землетрясений.

Таким образом, фактически в регистрации сейсмичности в течение года участвовал 41 пункт наблюдений: 9 на материковой части территории зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН, 25 пунктов, включая локальную сеть юга, на о. Сахалин, 7 стационарных наблюдательных пунктов на Курильских островах.

Количество землетрясений, определенных в оперативном режиме по данным как минимум трех сейсмических станций (с учетом пунктов наблюдений других организаций) в 2023 г. существенно возросло по сравнению с прошлым годом и составило 4690 событий, исключая идентифицированные как взрывы (рис. 1). Это 4266 землетрясений Курило-Охотского региона, 219 – Сахалинского региона (194 коровых и 25 глубокофокусных событий), 205 – Приамурья и Приморья (200 коровых и 5 глубокофокусных).

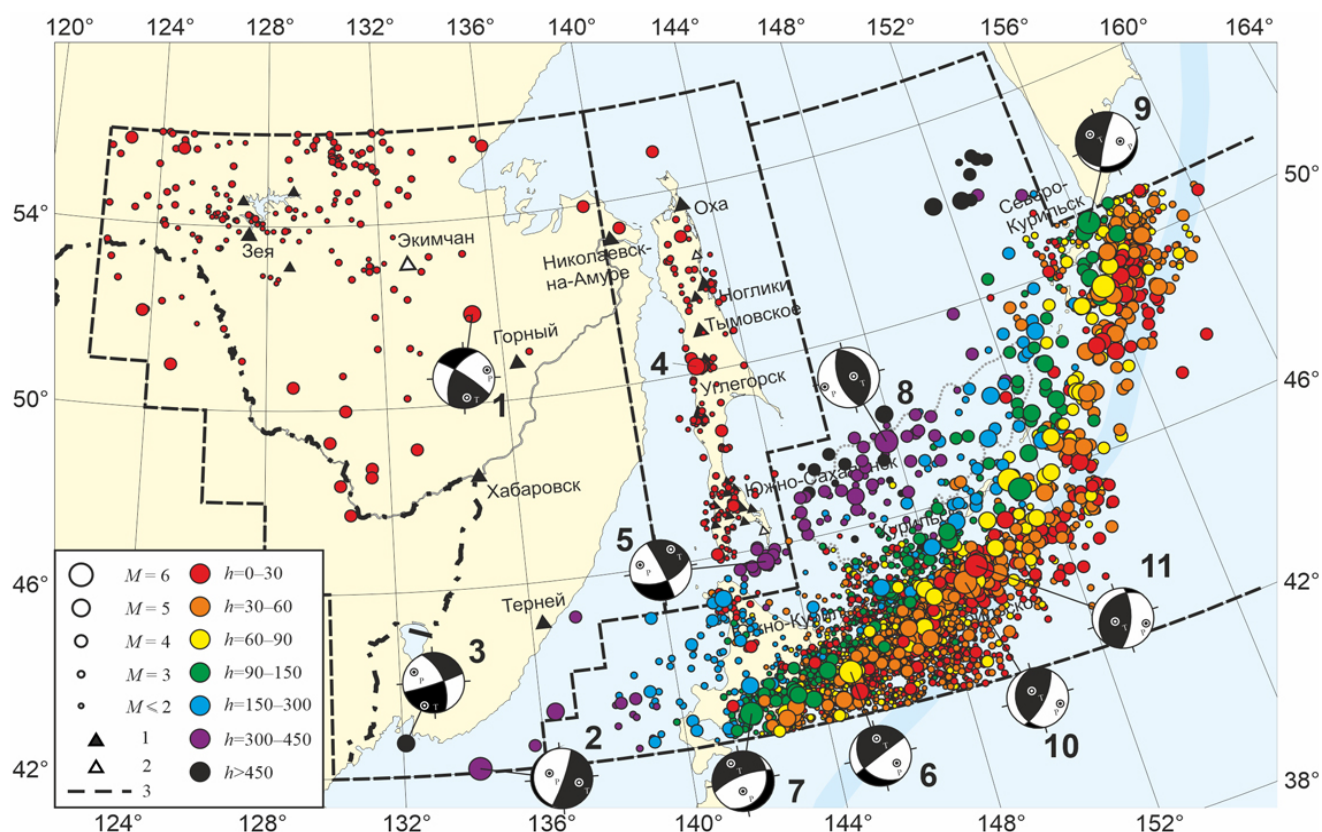


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2023 г. M – магнитуа ML ; h – глубина гипоцентра, км; 1, 2 – сейсмические станции СФ ФИЦЕГС РАН: 1 – действующие, 2 – не действующие в 2023 г.; 3 – границы регионов. Номера эпицентров землетрясений согласно табл. 1. Приведены механизмы очагов наиболее сильных землетрясений.

Fig. 1. Map of earthquake epicenters in the SB FRC UGS RAS zone of responsibility in 2023. M , magnitude; h , hypocenter depth, km; 1 and 2, seismic stations of the SB FRC UGS RAS: 1, operational; 2, non-operational in 2023; 3 – region borders. Numbers of earthquake epicenters are given in accordance with Table 1. Focal mechanisms of the strongest earthquakes are given.

Для 43 землетрясений определен тензор сейсмического момента центра и моментная магнитуда [3, 4].

80 землетрясений с эпицентрами в пределах зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН имели ощутимые проявления на территории регионов, помимо этого здесь зарегистрированы сотрясения от 6 землетрясений с эпицентрами за пределами территории (рис. 2).

Наиболее массовой энергетической характеристикой каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» в 2023 г. является региональная магнитуда ML (M_{wa} в обзоре прошлого года), она определена для всех землетрясений, а потому наиболее удобна для использования. К тому же, для ее определения используется наибольшее количество региональных сейсмостанций.

Для отдельных сильных и умеренно-сильных землетрясений был определен механизм очага [3, 4] и получена моментная магнитуда Mw_{per} .

Для связи каталога 2023 г. с более ранними данными, а также для расчета сейсмической энергии по формуле Гуттенберга–Рихтера ($Lg E = 4.8 + 1.5 M_s$, Дж [5]) – применялся переход от ML к основной расчетной магнитуде M , соответствующей магнитуде по поверхностной волне MLH (аналог M_s). Для Курило-Охотского региона и всех глубокофокусных землетрясений использована полученная ранее [2] формула: $M = 1.15 ML - 1.19$.

При наличии Mw_{per} M рассчитывалась по формуле [6]: $M = 1.24 Mw_{per} - 1.48$.

Для Приамурья и Приморья ML применяется недавно, массово – только с 2023 г., для Сахалинского региона особенности ее связи с другими магнитудами также не вполне ясны, потому для коровых землетрясений этих регионов для перехода к M использовался непосредственно, либо в качестве транзитного энергетический класс K_p [7], связанный с ML соотношением, полученным для Сахалинского региона [2]: $K_p = 1.54 ML + 4.61$.

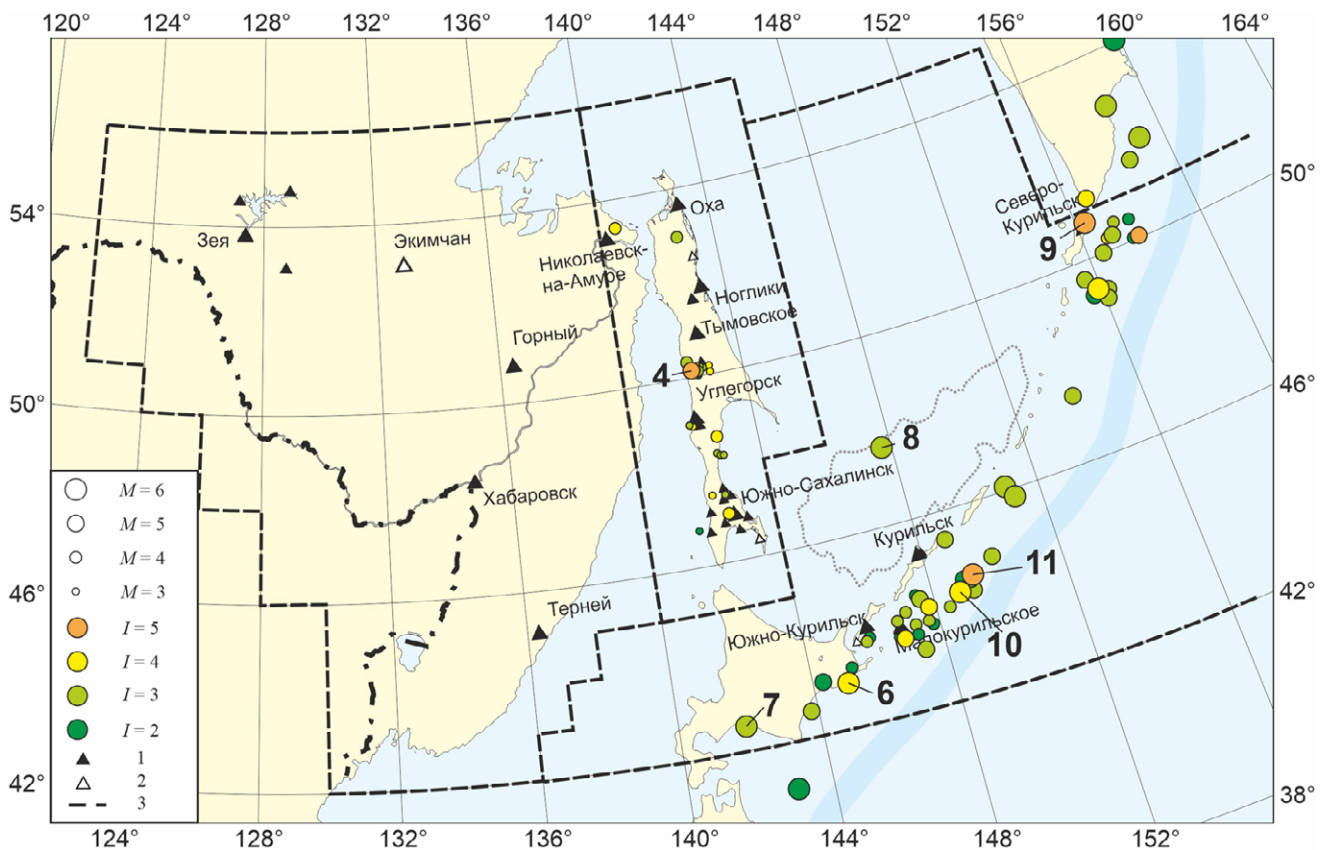


Рис. 2. Карта эпицентров ощутимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2023 г. M – магнитуда ML ; I – максимальная интенсивность сотрясений по данным СФ, балл; 1, 2 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН: 1 – действующие; 2 – не действующие в 2023 г.; 3 – границы регионов. Номера эпицентров землетрясений согласно табл. 1.

Fig. 2. Map of epicenters of felt earthquakes in the SB FRC UGS RAS zone of responsibility in 2023. M , magnitude; I , maximum shaking intensity according to SB data, point; 1 and 2, seismic stations of the SB FRC UGS RAS: 1, operational; 2, non-operational in 2023; 3, region borders. Numbers of the epicenters are given in accordance with Table 1.

Переход к M осуществлялся по формуле Т.Г. Раутиан [7]: $M = (K_p - 4)/1.8$.

В работе [6] опубликованы новые или уточненные формулы, связывающие MLH с другими энергетическими характеристиками землетрясений окончательного каталога Курило-Охотского региона по данным СФ ФИЦ ЕГС РАН. Эти соотношения были использованы для получения унифицированной расчетной магнитуды M землетрясений каталога Курило-Охотского региона 1981–2022 гг., а также глубоководных событий Приамурья и Приморья и Сахалинского региона 1981–2022 гг., использовавшихся для сопоставления с каталогом 2023 г.

Поскольку для коровых землетрясений Сахалина, а также континентальной части зоны ответственности Сахалинского филиала зависимости между магнитудами существенно отличаются от полученных для Курило-Охотского региона, в настоящей работе в каталогах 1981–2022 гг. для перехода к MLH от наиболее распространенных здесь энергетических классов и K_p и K_c использовались старые формулы из работ Т.Г. Раутиан [7] и С.Л. Соловьева [8], хотя в будущем предполагается проверить актуальность этих зависимостей, а также получить недостающие связи между ML и другими энергетическими характеристиками региональных каталогов. В настоящий момент получению этих соотношений для коровых землетрясений Сахалина и континентальной территории препятствует малое количество и узкий диапазон данных.

Основные характеристики сейсмичности

Одной из базовых характеристик для обобщенного описания сейсмичности является выделенная в изучаемый период сейсмическая энергия ΣE , оцениваемая по магнитуде зарегистрированных землетрясений. Этот важный параметр дает общее представление о сейсмической активности региона.

В обзоре прошлого года авторы высказали сомнение в точности расчетов унифицированной магнитуды использованных каталогов с применением имевшихся на тот момент переходных формул. Поэтому была проведена

работа по уточнению [6] межмагнитудных соотношений для Курило-Охотского региона. С учетом продолжения сейсмофокальной зоны под Сахалин и Приморье, полученные формулы можно применять и для глубоких событий этих регионов. Для сильных событий новые соотношения при пересчете унифицированной магнитуды дают оценки близкие к полученным ранее. Поэтому значения суммарной энергии землетрясений Курило-Охотского региона в наиболее сейсмически активные годы мало отличаются от ранее публиковавшихся, однако для периодов с меньшим количеством сильных землетрясений уточнение унифицированной магнитуды дает более заметный эффект.

Статистически обоснованное сравнение параметра ΣE 2023 г. со значениями за длительный временной период дают графики функции распределения годовой сейсмической энергии F по методике СОУС'09 [9] (рис. 3 и 4) согласно предложенной В.А. Салтыковым градации уровней сейсмичности:

- экстремально высокий – $F \geq 0.995$,
- высокий – $0.975 < F < 0.995$,
- фоновый повышенный – $0.85 < F < 0.975$,
- фоновый средний – $0.15 < F < 0.85$,
- фоновый пониженный – $0.025 < F < 0.15$,
- низкий – $0.005 < F < 0.025$,
- экстремально низкий – $F < 0.005$.

Основой для построения графиков функции распределения послужили региональные каталоги Приамурья и Приморья 1975–2023 гг., Сахалинского региона 1962–2023, Курило-Охотского региона 1920–2023 гг. [10–12], дополненные данными Сахалинского филиала СФ ФИЦ ЕГС РАН, включая предварительные данные РИОЦ «Южно-Сахалинск» за 2023 г.

В регионе Приамурья и Приморья (рис. 3 а) уровень коровой сейсмичности 2023 г. оценивается как фоновый средний на уровне 21-го квантиля распределения ($F = 0.21$). Значение функции распределения глубоководной сейсмичности $F = 0.72$ соответствует среднему фоновому уровню.

В Сахалинском регионе (рис. 3 б) уровень коровой сейсмичности 2023 г. фоновый пониженный ($F = 0.11$), самый низкий с 1991 г. Глубоководная сейсмичность ($F = 0.86$) на фоновом повышенном уровне.

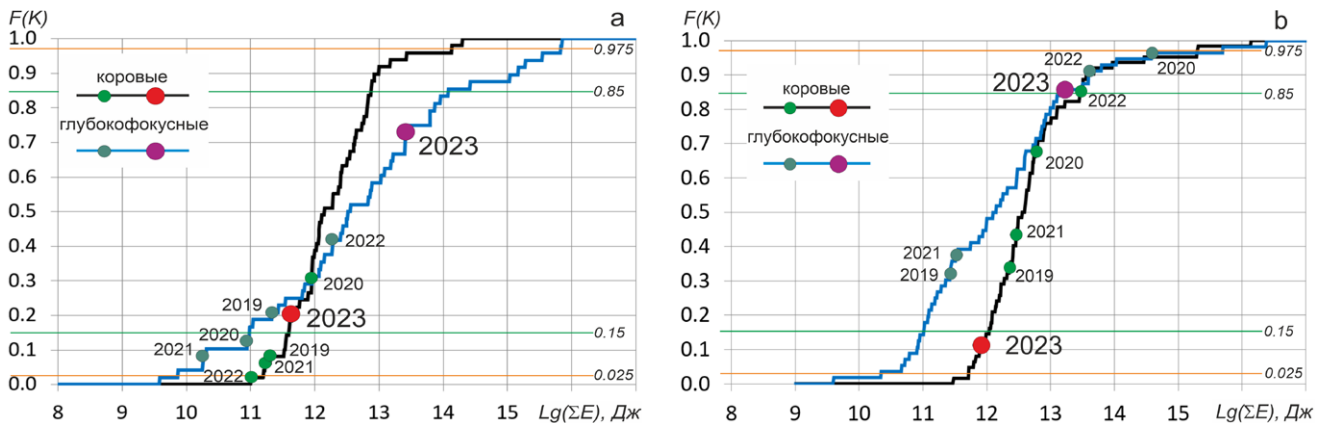


Рис. 3. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии для коровых (черный цвет линии) и мантийных (синий цвет) землетрясений региона Приамурье и Приморье (а) и Сахалинского региона (б). Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2019–2023.

Fig. 3. Empirical distribution function of the annual seismic energy for crustal (black line) and mantle (blue line) earthquakes in the Amur-Primorye region (a) and Sakhalin region (b). The dots corresponding to each year of the period 2019–2023 are marked.

В Курило-Охотском регионе (рис. 4) уровень сейсмичности ($F = 0.22$) вблизи границы между средним и пониженным фоновым. При этом уровень сейсмичности 2022 г. из-за пересмотра значений M опустился в самый низ диапазона фоновой сейсмичности, а 2017 г. даже вышел за его пределы и оценивается как низкий.

Способом проследить ход сейсмического процесса во времени является график Бенъофа. Как и в предыдущих ежегодных обзорах, получен график Бенъофа для Курило-Охот-

ского и коровых событий Сахалинского региона (рис. 5 d, f). Поскольку оперативный каталог 2023 г. (в отличие от предыдущих обзоров) содержит довольно большое число землетрясений Приамурья и Приморья, для коровых событий этого региона также получен график Бенъофа (рис. 5 b). Для сравнения на основе каталогов окончательных данных были построены графики за более длительный интервал времени – с 1981 г., в вариантах для всех известных событий по данным СФ ФИЦ ЕГС РАН и для событий выше определенной магнитуды (рис. 5 a, c, e), чтобы снизить влияние изменяющейся представительности каталогов, поскольку, в отличие от величины ΣE , определяемой сильнейшими землетрясениями каталога, на величину $\Sigma E^{1/2}$ оказывают сопоставимое влияние землетрясения различных магнитудных диапазонов, а потому ощутим пропуск слабых событий.

В регионе Приамурье и Приморье на протяжении 44 лет, судя по наклону графика Бенъофа, сейсмический процесс достаточно равномерен. Выделяются ступенями два сильнейших региональных землетрясения этого периода – Приморское землетрясение 13 ноября 1990 г. с $M = 6.2$ ($M_w = 5.9$, $h = 18$ км) с эпицентром в Татарском проливе и Сковородинское землетрясение 14 октября 2011 г. с $M = 6.3$ ($M_w = 6.0$, $h = 16$ км) в Верхнем Приамурье [12]. Можно отметить существенное уменьшение угла наклона графика на участках фоновой сейсмичности (без ступеней сильных

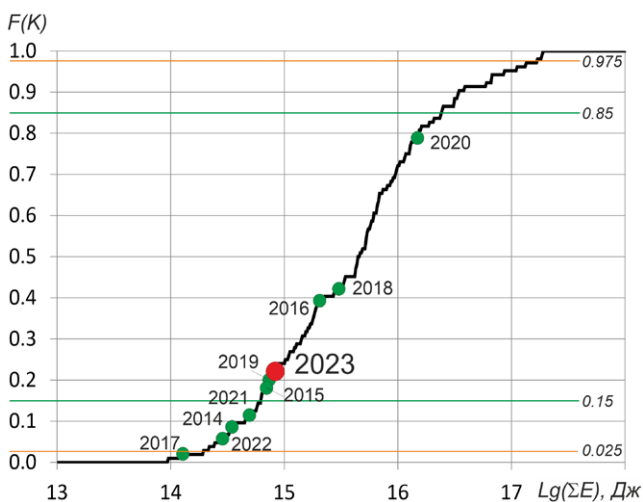


Рис. 4. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии землетрясений Курило-Охотского региона. Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2014–2023.

Fig. 4. Empirical distribution function of the annual seismic energy of the earthquakes in the Kuril-Okhotsk region. The dots corresponding to each year of the period 2014–2023 are marked.

событий) в 2019–2022 г., закончившееся в 2023 (по предварительным данным). Впрочем, для тектонически сложного региона с длительной подготовкой сильнейших землетрясений рассматриваемого интервала времени может оказаться недостаточно для выводов о существовании сейсмического затишья или активизации. В 2023 г. наклон графика Бенъофа равномерен, при этом в условиях слабой сейсмичности на годовом интервале даже несильные землетрясения магнитудой $M = 3.8–4.2$ создают на нем заметную ступень.

В Сахалинском регионе на интервале 1981–2023 гг. выделяются сильнейшие региональные события – Нефтегорское землетрясение 27 мая 1995 г. с $M = 7.0$ ($M_w = 7.0$, $h = 18$ км) в северной части острова, Углегорское 4 августа 2000 г. с $M = 7.0$ ($M_w = 6.8$, $h = 13$ км) в центральной части и серия Невельских событий 2 августа 2007 г. с $M = 6.1, 6.3$ ($M_w = 5.8, 6.2$, $h = 10$ км) на юге. При этом наблюдается постепенное увеличение угла наклона графика на прямолинейных участках, что отчасти связано с увеличением полноты регионального каталога, в основном за счет развертывания сети локальных наблюдений юга острова. Как видно из варианта графика (рис. 5 с), построенного по выборке с $M \geq 3.5$, после Нефтегорского и Углегорского землетрясений, когда закончился предшествовавший им период сейсмического затишья, наклон графика фоновой сейсмичности остается примерно постоянным с небольшими вариациями без признаков начала нового периода сейсмического затишья перед сильнейшим региональным землетрясением. С учетом характерной длительности сейсмического цикла сильнейших региональных землетрясений порядка тысячи лет, как и в случае с Приамурьем и Приморьем, представленный на рис. 5 временной интервал может оказаться слишком коротким для подобных выводов. При этом для более слабых событий выявление интервалов сейсмического затишья может служить первым этапом успешных прогнозных оценок по потоку сейсмичности, как показано в работе [13].

2023 год в Сахалинском регионе, согласно графику (рис. 5 d), начался с небольшой активизации, выразившейся в рое слабых землетрясений в районе с. Онон в январе–

марте, при этом общий сейсмический поток был настолько слабым, что на графике Бенъофа заметную ступень создают даже события с $M = 3.8–4.2$. На фоне длительного периода времени (рис. 5 с) 2023 год (по предварительным данным) отмечается уменьшением наклона графика.

Для Курило-Охотского региона (рис. 5 e) событиями регионального масштаба, создавшими значительную ступень на графике Бенъофа в 1981–2023 гг., являются в первую очередь землетрясения магнитудой $M \geq 8.0$: Шикотанское 4 октября 1994 г. с $M = 8.3$ ($M_w = 8.3$, $h = 23$ км), Симуширские 15 октября 2006 г. с $M = 8.0$ ($M_w = 8.3$, $h = 37$ км) и 13 января 2007 г. с $M = 8.1$ ($M_w = 8.1$, $h = 45$ км), глубокофокусное Охотоморское 24 мая 2013 г. с $M = 8.3$ ($M_w = 8.3$, $h = 630$ км). При этом даже столь сильные события не сопровождались длительными интервалами сейсмического затишья на уровне всего региона, что является следствием интенсивного сейсмического процесса, хотя некоторое уменьшение кривой фоновой сейсмичности на годовом интервале можно отметить. В 2023 г. (рис. 5 f) наблюдается в целом ровный наклон графика Бенъофа с небольшими ступенями нескольких наиболее сильных, $M \geq 5.5$ землетрясений. Событие с самой большой магнитудой 28 декабря ($M_{w\text{ пер}} = 6.4$, $h = 17$ км) предварялось небольшим сейсмическим затишьем с уменьшением наклона графика. На общем фоне длительного временного интервала (рис. 5 e) 2023 г. никак не выделяется.

Для оценки распределения сейсмичности по площади территории помимо карт эпицентров (рис. 1, 2) построены карты распределения величины плотности условной упругой деформации в единицу времени для 2023 г. (рис. 6 a) и для длительного интервала 1981–2023 гг. (рис. 6 b). Методика построения повторяет использованную ранее [1] с небольшими изменениями. На карту добавлен регион Приамурье и Приморье. Поскольку масштаб карты увеличился, для обоих временных диапазонов расчет параметра e : $e = 1000 \cdot \Sigma E^{1/2} / (S \cdot T)$ (E – энергия землетрясения, Дж; S – площадь поверхности, содержащей эпицентр землетрясения, км²; T – длительность временного отрезка, год) производился в ячейке $0.2^\circ \times 0.2^\circ$

с последующим усреднением площадкой размером $0.6^{\circ} \times 0.6^{\circ}$ скользящим окном с шагом 0.2° . Использовались упомянутые выше региональные каталоги 1981–2023 гг., ограниченные снизу магнитудой $M = 2.2$, что стало компромиссом между необходимостью использования представительного каталога и же-

лением показать сейсмичность слабоактивных участков.

Картина распределения параметра e за период с 1981 г. в Курило-Охотском и Сахалинском регионе описана в предыдущем обзоре [1]. В Приамурье (рис. 6 а) полосами со значением средней годовой величины условной

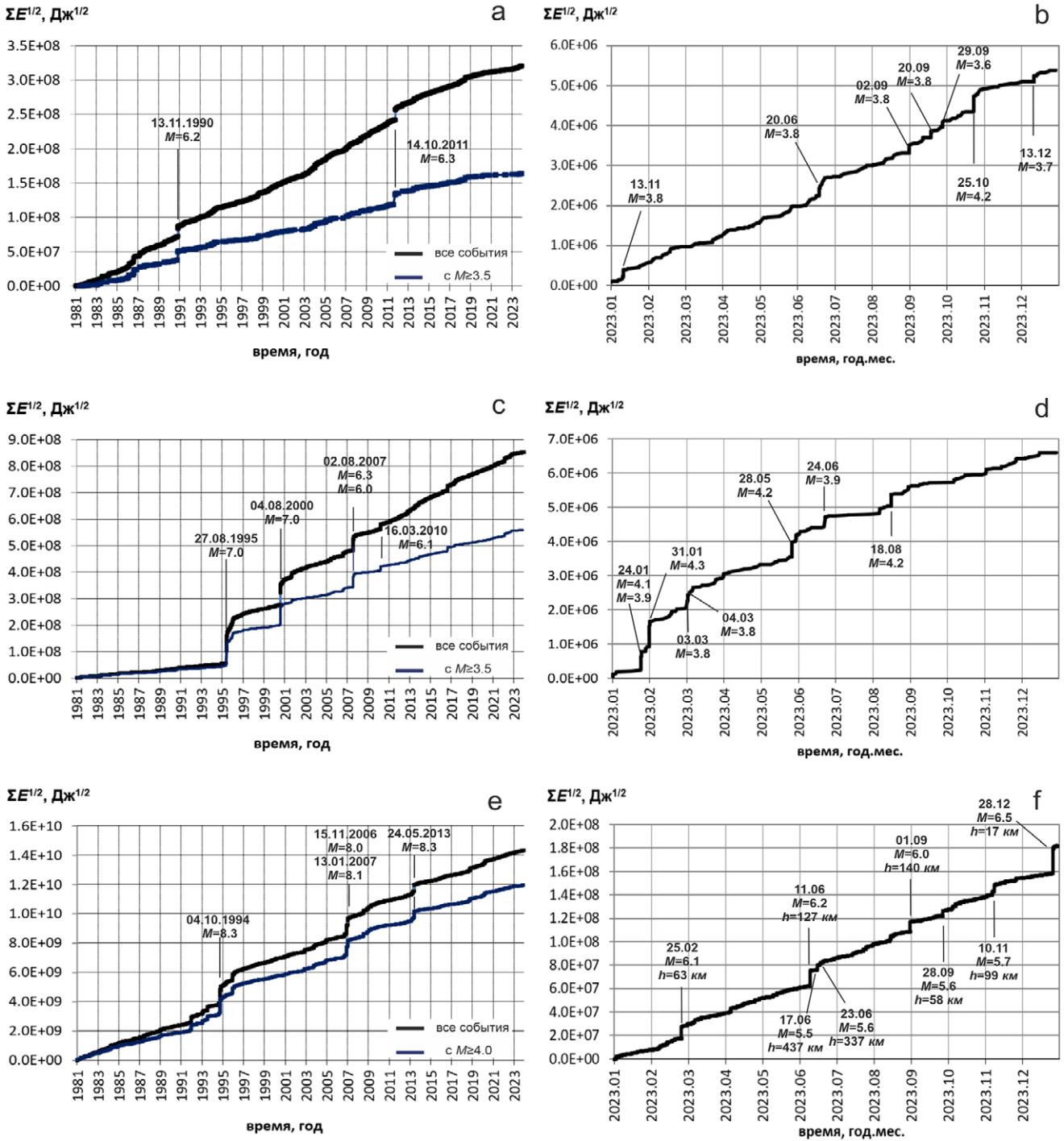


Рис. 5. Графики Беньофа для зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН: Приамурья и Приморья за 1981–2023 гг. (а) и 2023 г. (б); Сахалинского региона за 1981–2023 гг. (с) и 2023 г. (д); Курило-Охотского региона 1981–2023 гг. (е) и 2023 г. (ф).

Fig. 5. Benioff graphs for SB FRC UGS RAS zone of responsibility: the Amur–Primorye region in 1981–2023 (a) and 2023 (b); the Sakhalin region 1981–2023 (c) and 2023 (d); the Kuril–Okhotsk region 1981–2023 (e) and 2023 (f).

упругой деформации в $e = 10^4\text{--}10^5$ Дж^{1/2}/год на 1000 км² выделяются основные линейменты зон Монголо-Охотской разломной системы и системы Танлу. Наибольшие значения e в Приамурье связаны с очагом Сковородинского землетрясения 14 октября 2011 г. Область более высоких значений плотности условной упругой деформации находится на юге Приморья и в Японском море вдоль побережья. Она связана преимущественно с глубоководной сейсмичностью, где в 1981–2023 гг. регистрировались сильные землетрясения магнитудой до $M = 7.4$. Детально коровая и глубоководная сейсмичность региона, включая распределение e , рассмотрена в работе [12].

В 2023 г. (рис. 6 б) максимальные значения $e = 2.8 \cdot 10^7$ Дж^{1/2}/год на 1000 км² наблюдаются

в южной части Курило-Охотского региона, они связаны с событием 28 декабря с $M = 6.5$ ($ML = 6.3$) и сопоставимы с максимумами этого параметра в очаге Шикотанского события 1994 г., усредненного на 43-летний временной период. Наиболее сейсмически активная область, протянувшаяся между островной дугой и глубоководным желобом и связанная с зоной контакта плит, в 2023 г заметно менее активна, чем в среднем за период с 1981 г. В Сахалинском регионе на общем фоне выделяется рой землетрясений в центре острова в районе с. Онор, а также глубоководное событие на юге. В Приамурье и Приморье землетрясений мало, более или менее плотная сеть значений $e = 10^4\text{--}10^5$ Дж^{1/2}/год на 1000 км² наблюдается вдоль северной границы региона, особенно

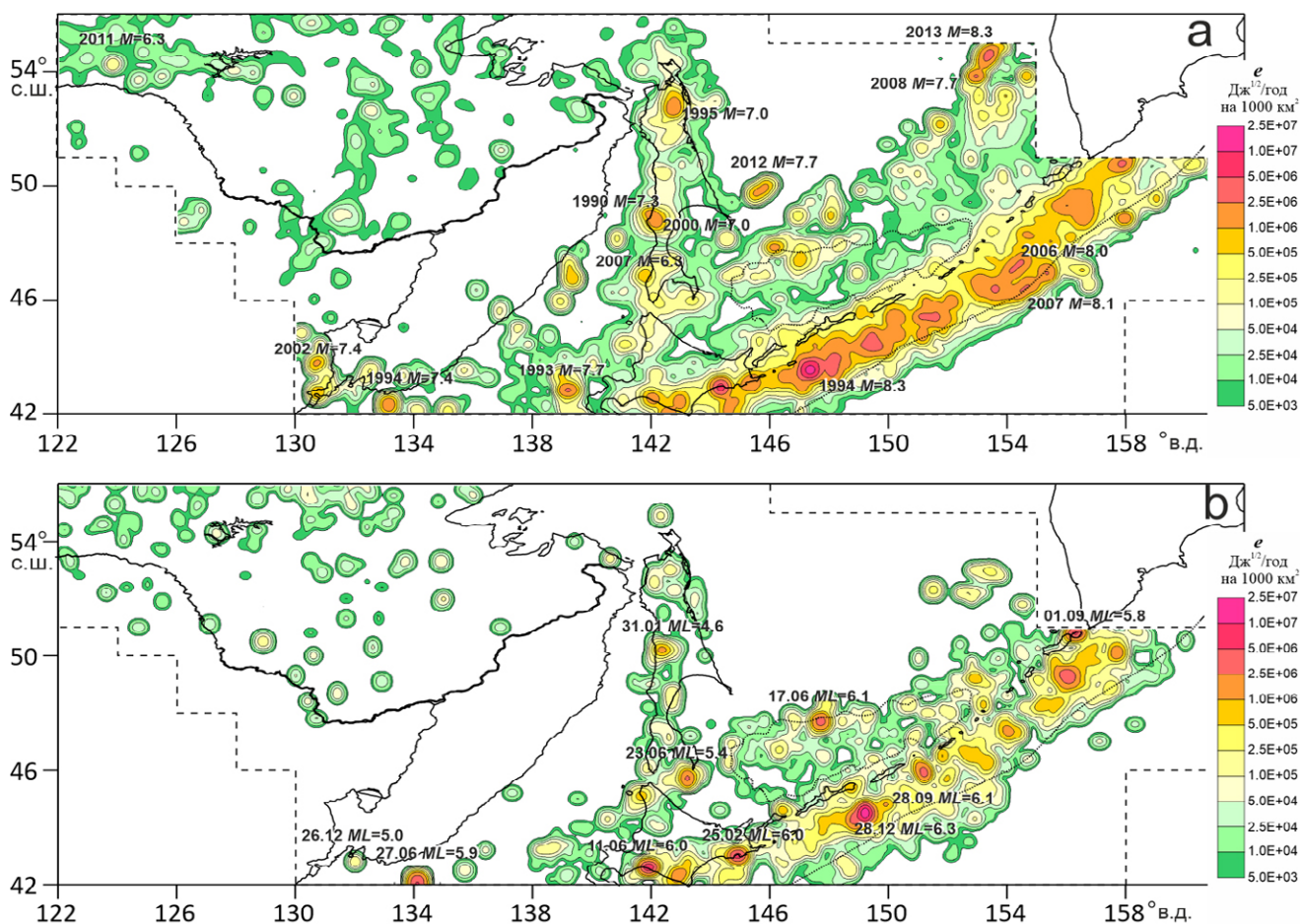


Рис. 6. Плотность условной упругой деформации Сахалинского и Курило-Охотского регионов по данным каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН 1981–2023 гг. (а) и РИОЦ «Южно-Сахалинск» 2023 г. (б). Обозначены наиболее значимые региональные землетрясения. Пунктиром показана граница зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН, точками положение Курильского глубоководного желоба и Курильской глубоководной котловины.

Fig. 6. Density of nominal elastic deformation of the Sakhalin and Kuril-Okhotsk regions according to the data of the SB FRC UGS RAS earthquake catalogs in 1981–2023 (a) and the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC earthquake catalog in 2023 (b). The most significant regional earthquakes are marked. The dotted line indicates the border of the zone of responsibility of the SB FRC UGS RAS, dots indicate the position of the Kuril deep-sea trench and the Kuril deep-sea basin.

на центральном ее участке, где в пределы зоны ответственности филиала попадает юго-восточная часть Становой разломной зоны. На самом юге региона выделяется сильное глубоководное событие 27 июня с $M = 5.7$, здесь $e = 7.2 \cdot 10^6$ Дж^{1/2}/год на 1000 км² существенно превышает среднегодовые значения.

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

В *Приамурье и Приморье* в 2023 г. зарегистрировано 200 коровых и 5 глубоководных

землетрясений, ощутимых землетрясений в этом году здесь не отмечено.

Наиболее сильные события года с $M \geq 3.5$ в основном произошли в центральной части региона в районе диагональной системы разломов Танлу, пересекающей регион от среднего течения р. Амур в направлении устья реки. Самое сильное коровое землетрясение 2023 г. произошло 2 сентября в 15:33 UTC ($ML = 5.0$, $Mw = 4.2$, $h = 14$ км; № 1) (здесь и далее номер события приводится по табл. 1) в районе Буреинского хребта. Данных об ощутимых проявлениях этого землетрясения в филиал не поступало, что заставляет усомниться в кор-

Таблица 1. Параметры наиболее значимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН 2023 г. (по данным РИОЦ «Южно-Сахалинск»)

Table 1. Parameters of the most significant earthquakes in the SB FRC UGS RAS zone of responsibility in 2023 (according to the data of the “Yuzhno-Sakhalinsk” RIPC)

№	Дата / Date dd.mm.yyyy	Время / Time, t_0 hh:mm:ss	φ N	λ E	h , км	ML/Mw	Интенсивность сотрясений (населенный пункт, балл / Shaking intensity (locality, points))
Приамурье и Приморье / Amur–Primorye region							
1	02.09.2023	15:33:01	51.93	135.10	14	5.0 4.2	Нет данных об ощутимости
2	27.06.2023	23:38:19	42.08	134.14	442	5.9 5.8	То же
3	26.12.2023	19:10:21	42.73	132.09	515	5.0 4.5	– « –
Сахалинский регион / Sakhalin region							
4	31.01.2023	05:25:34	50.13	142.34	4	4.6 –	с. Оноп, 4-5; пос. Смирных, 2-3
5	23.06.2023	17:39:12	45.69	143.24	337	5.4 5.6	Нет данных об ощутимости
Курило-Охотский регион / Kuril–Okhotsk region							
6	25.02.2023	13:27:43	42.96	144.95	63	6.0 6.1	пос. Южно-Курильск, Лагунное, Горячий Пляж, Головнино, Малокурильское, Менделеево – 3-4; с. Горный – 2-3; г. Курильск – 2; о. Хоккайдо, Япония – до 5 по шкале JMA*
7	11.06.2023	09:54:45	42.51	141.94	127	6.0 6.2	пос. Южно-Курильск, Менделеево – 2-3; о. Хоккайдо, Япония – до 5 по шкале JMA**
8	17.06.2023	11:35:56	47.62	147.73	437	6.1 5.6	пос. Малокурильское – 3; о. Хоккайдо, Хонсю, Япония – до 2 по шкале JMA***
9	01.09.2023	20:49:57	50.73	156.31	140	5.8 6.0	г. Северо-Курильск – 4-5
10	28.09.2023	17:40:05	44.22	148.83	58	6.1 5.7	г. Курильск, с. Горный, Горячие Ключи, Рейдово – 3-4; пос. Южно-Курильск, Малокурильское – 2
11	28.12.2023	09:15:10	44.50	149.28	17	6.3 6.4	г. Курильск, с. Рейдово, Горный – 4-5; с. Китовое – 4; пос. Южно-Курильск, Головнино, Малокурильское – 2-3

*<https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2023/02/25/2023-02-25-22-27-54.html>

**<https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2023/06/11/2023-06-11-18-55-03.html>

***<https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2023/06/17/2023-06-17-20-37-16.html>

ректности определения ML ; вероятнее всего, ее оценка завышена. Для расчетов энергии этого события был использован класс Раутиан $K_p = 10.9$, что соответствует $M = 3.8$. Механизм очага классифицируется как сдвиговый, очаг сформировался в условиях широтного сжатия и меридионального растяжения под небольшим углом к горизонту.

В 2023 г. в южной части региона произошло два сравнительно сильных глубокофокусных землетрясения: 27 июня в 23:38 UTC ($ML = 5.9$, $M_w = 5.8$, $h = 442$ км; № 2) и 26 декабря в 19:10 UTC ($ML = 5.0$, $M_w = 4.5$, $h = 515$ км; № 3). Оба события связаны с продолжением под территорию региона Японской сейсмофокальной зоны. Механизм очага первого землетрясения взрезового типа с вертикальной плоскостью юго-юго-западного простирания и горизонтальной восток-юго-восточного. Механизм очага второго события сдвиговый, с нодальными плоскостями северо-северо-западного и восток-северо-восточного простирания с небольшим наклоном к вертикали. При рассмотрении механизмов этих событий относительно субдуцирующей плиты первое является взбросо-сдвигом в условиях сжатия вдоль направления ее движения, второе – чистый сдвиг с сохранением того же направления сжатия и осью растяжения примерно в плоскости плиты.

В *Сахалинском регионе* по данным каталога РИОЦ «Южно-Сахалинск» в 2023 г. произошло 194 коровых и 25 глубокофокусных землетрясения, включая 32 ощутимых (рис. 1, 2).

В земной коре наиболее значительная сейсмическая активизация, хотя и без сильных землетрясений, произошла в начале года в центральной части острова в Западно-Сахалинских горах юго-западнее с. Онор. С 24 января по 7 марта здесь зарегистрировано 31 событие в магнитудном диапазоне $ML = 1.8$ – 4.6 , включая наиболее сильные: 24 января 15:57 UTC ($ML = 4.4$, $h = 10$ км), которое предварялось тремя более слабыми событиями с 15:30 UTC; 31 января 05:25 UTC ($ML = 4.6$, $h = 4$ км, № 4), сопровождавшееся в тот же день серией более слабых событий магнитудой до $ML = 3.8$; 4 марта 05:13 UTC ($ML = 4.0$, $h = 12$ км). 12 событий этой серии, а также 4 землетрясения в том же районе позднее ощущались жите-

лями с. Онор. Наибольшие сотрясения вызвали события 24 января (4 балла в с. Онор) и 31 января (4-5 баллов в с. Онор и 3 балла в расположенном южнее пос. Смирных). Эпицентры этого роя землетрясений расположены примерно на 20 км южнее сильного Онорского землетрясения 14 августа 2016 г. с $M = 5.7$ [14], а два слабых землетрясения 2 и 3 февраля 2023 г. прямо попадают в очаговую зону этого события.

Активизация диагональных опережающих разломов в Западно-Сахалинских горах между крупнейшими региональными Западно- и Центральными-Сахалинской разломными зонами является интересной темой для исследования. Сильные землетрясения обычно вызывают с наиболее крупными региональными разломами, в Сахалинском регионе в основном вытянутыми вдоль острова, в то время как часть сильнейших сахалинских землетрясений (включая крупнейшие Монеронское 1971 г., Нефтегорское 1995 г., а также Онорское 2016 г.) произошли на разломах диагонального простирания относительно основных тектонических структур острова.

Наиболее сильное по магнитуде землетрясение Сахалинского региона в 2023 г. (как и годом ранее) произошло в мантии 23 июня в 17:39 UTC ($ML = 5.4$, $M_{w_{per}} = 5.7$, $h = 337$ км; № 5), его эпицентр находится южнее мыса Анива. Механизм очага сдвигового типа с субвертикальной плоскостью северо-северо-западного простирания и наклоненной на юго-юго-восток под углом $DP = 54^\circ$ плоскостью восток-северо-восточного простирания. Такая ориентация нодальных плоскостей в системе отсчета, связанной с погружающейся Тихоокеанской плитой, соответствует чистому сдвигу и наиболее распространена среди мантийных землетрясений южной части Сахалинского региона [15], при этом одна из возможных плоскостей подвижки совпадает с направлением движения плиты, а вторая ему ортогональна. Возможно, причиной мантийных землетрясений в этой части субдуцирующей плиты являются подвижки по одному или нескольким трансформным разломам.

В *Курило-Охотском регионе* в 2023 г. зарегистрировано 4266 землетрясений, 2860 из которых с $ML \geq 2.2$. Большая часть земле-

трясений – 3092 – произошли в земной коре региона или в зоне контакта Тихоокеанской и Охотской литосферных плит на глубинах $h \leq 70$ км. В диапазоне промежуточных глубин $h = 70–300$ км зарегистрировано 1081 событие, глубоководных ($h \geq 70$ км) событий – 23. Ощутимые колебания на территории Сахалинской области вызвали 48 региональных землетрясений (рис. 2).

25 февраля в 13:27 UTC ($M_L = 6.1$, $M_{w_{\text{пер}}} = 6.0$, $h = 63$ км; № 6) произошло землетрясение вблизи северо-восточного побережья о. Хоккайдо. На Курильских островах интенсивность вызванных им сотрясений достигала 3-4 баллов MSK-64. На о. Хоккайдо в г. Сибецу (округ Немуро) максимальная интенсивность сотрясений оценивается, по данным Японского метеорологического агентства, в 5 баллов шкалы JMA (примерно 6 баллов MSK-64). Механизм очага землетрясения взрезного типа с вертикальной нодальной плоскостью запад-юго-западного простирания и наклоненной под углом $DP = 30^\circ$ к юго-западу плоскостью юго-юго-восточного простирания. Такой механизм очага необычен для землетрясений на границе плит; возможно, очаг этого землетрясения сформировался в области растяжения внутри Тихоокеанской литосферной плиты.

11 июня в 09:54 UTC ($M_L = 6.0$, $M_{w_{\text{пер}}} = 6.2$, $h = 127$ км; № 7) зарегистрировано еще одно событие с эпицентром в районе о. Хоккайдо, на этот раз – у южного побережья острова. На Курильских островах это событие ощущалось слабо – до 2-3 баллов в пос. Южно-Курильск и Менделеево, однако японские сейсмологи вновь оценивают максимальную интенсивность его проявлений в городах Титосэ, Ацума и Уракава префектуры Хоккайдо в 5 баллов шкалы JMA. Механизм очага этого события сбросовый, с нодальной плоскостью восток-юго-восточного простирания, круто падающей $DP = 70^\circ$ почти на север, и более пологий северо-восточного простирания. По механизму очага и глубине гипоцентра это событие можно уверенно отнести к нижнему слою сейсмофокальной зоны внутри Тихоокеанской плиты.

Событие 17 июня в 11:35 UTC ($M_L = 6.1$, $M_{w_{\text{пер}}} = 5.6$, $h = 437$ км; № 8) с эпицентром в северной части Курильской глубоководной

котловины необычно тем, что, несмотря на значительную глубину и удаленность от населенных пунктов, вызвало ощутимые колебания: в пос. Малокурильское отмечено 3 балла MSK-64; до 2 баллов JMA по данным агентства отмечено также на о. Хоккайдо и в северной части о. Хонсю. Механизм очага этого события взбросовый с субмеридианальной ориентацией нодальных плоскостей.

1 сентября в 20:49 UTC ($M_L = 5.8$, $M_{w_{\text{пер}}} = 6.0$, $h = 140$ км; № 9) произошло наиболее сильное в 2023 г. землетрясение в районе Северных Курил. Несмотря на значительную глубину очага, в г. Северо-Курильск оно ощущалось с интенсивностью в 4-5 баллов. Механизм очага взрезовой с субвертикальной нодальной плоскостью, ориентированной вдоль островной дуги. Этим данное событие похоже на два произошедших под Хоккайдо и описанных выше. Судя по механизму очага и глубине гипоцентра, очаг тоже расположен в нижнем слое двойной сейсмофокальной зоны внутри Тихоокеанской плиты.

События 28 сентября в 17:40 UTC ($M_L = 6.1$, $M_{w_{\text{пер}}} = 5.7$, $h = 58$ км; № 10) и 28 декабря в 09:15 UTC ($M_L = 6.3$, $M_{w_{\text{пер}}} = 6.4$, $h = 17$ км; № 11) произошли в районе Южных Курил, их эпицентры разделяет 50 км. Механизмы очага этих событий схожи – если не учитывать небольшую разнонаправленную сдвиговую компоненту, это «классические» взрезы с пологий ($DP = 21–27^\circ$) нодальной плоскостью, ориентированной вдоль дуги и падающей под острова (что совпадает с плоскостью контакта плит), характерные для субдукционных землетрясений на границе плит. Менее сильное из событий 28 сентября, произошедшее на большей глубине, слабее ощущалось на поверхности – до 3-4 баллов в г. Курильск, с. Горный, Горячие Ключи и Рейдово. Землетрясение 28 декабря, ставшее наиболее сильным событием региона с 2020 г., ощущалось в г. Курильск, с. Рейдово и Горный с интенсивностью до 4-5 баллов.

Заключение

Предварительный каталог РИОЦ «Южно-Сахалинск» в 2023 г. содержит 4690 землетрясений, обработанных по данным как минимум трех сейсмостанций, исключая идентифицированные как взрывы. Большинство этих

событий зарегистрировано в пределах Курило-Охотского региона – 4266, в Сахалинском регионе – 219 (25 глубокофокусных), в Приамурье и Приморье – 205 (5 глубокофокусных).

Сеть сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН продолжает сокращаться. В 2023 г. в ней официально числится 46 пунктов установки сейсмологической аппаратуры, из которых только на 41 регистрация землетрясений велась большую часть времени в течение года.

80 землетрясений с эпицентрами в пределах зоны ответственности филиала имели ощутимые проявления на территории регионов. Помимо этого здесь зарегистрированы сотрясения от 6 землетрясений с эпицентрами за пределами территории. Максимальная зарегистрированная Сахалинским филиалом интенсивность сотрясений в течение года составила 4-5 баллов MSK-64, такая интенсивность наблюдалась три раза: дважды на Курильских островах и один на Сахалине.

По критерию суммарной сейсмической энергии, оцениваемой по методике СОУС'09, в 2023 г. сейсмичность всех трех регионов оставалась в пределах фонового уровня. При этом коровая сейсмичность Сахалинского региона на фоновом пониженном уровне, а глубокофокусная – на фоновом повышенном.

Получена карта распределения плотности условной упругой деформации e (по Беньофу) по площади трех регионов зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН, включая Приамурье и Приморье, для 2023 г. Для сравнения приведена карта средней ежегодной скорости накопления этой величины на территории регионов в 1981–2023 гг.

В 2023 г. пиковые значения параметра e связаны с сильнейшими землетрясениями Курило-Охотского региона, включая наиболее сильное событие 28 декабря с $M_{w\text{рег}} = 6.4$, глубокофокусными землетрясениями на юге Сахалинского региона и Приморья. На Сахалине выделяется рой слабых землетрясений в районе с. Онор в центральной части острова. За исключением очаговой области глубокофокусного события 27 июня с $M_{w\text{рег}} = 5.8$ к югу от Приморья, значения плотности условной упругой деформации не превышают среднегодовые, что говорит о фоновом характере произошедших землетрясений.

Список литературы

1. Сафонов Д.А., Семенова Е.П. **2023**. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2022 году. *Геосистемы переходных зон*, 7(2): 132–148. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.132-148>
2. Safonov D.A., Semenova E.P. **2022**. Regional magnitude M_{w} in the Russian Far East. *Seismic Instruments*, 58(Suppl 1): S42–S57. <https://doi.org/10.3103/S074792392207009X>
3. Sokos E., Zahradník 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>
4. 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. URL: http://itig.as.khb.ru/POG/2017/n_3/PDF_3_17/102-112.pdf
5. Richter C.F. **1958**. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
6. Сафонов Д.А. **2024**. Переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Курило-Охотского региона // *Вопросы инженерной сейсмологии*, 51(2): 102–117.
7. Раутиан Т.Г. **1964**. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км. *Экспериментальная сейсмика*. М.: Наука, 88–93. (Труды ИФЗ АН СССР; № 32(199)).
8. Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. **1967**. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений. *Физика Земли*, 2: 13–23.
9. Салтыков В.А. **2011**. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки. *Вулканология и сейсмология*, 2: 53–59.
10. Поплавская Л.Н. (ред.) **2006**. *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.
11. Ким Ч.У., Андреева М.Ю. **2009**. *Каталог землетрясений Курило-Камчатского региона (1737–2005 гг.)*. Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 126 с.
12. Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Коваленко Н.С. **2019**. *Сейсмичность региона Приамурье и Приморье*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 104 с.
13. Tikhonov I.N., Kim Ch.U. **2010**. Confirmed prediction of the 2 August 2007 M_w 6.2 Nevelsk earthquake (Sakhalin Island, Russia). *Tectonophysics*, 485(1–4): 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.12.002>
14. Прытков А.С., Сафонов Д.А., Полец А.Ю. **2018**. Модель очага Онорского землетрясения 14 августа 2016 г. $M_w = 5.8$ (о. Сахалин). *Тихоокеанская геология*, 37(5): 112–119. doi: 10.30911/0207-4028-2018-37-5-112-119

15. Safonov D.A. **2020**. Reconstruction of the tectonic stress field in the deep parts of the Southern Kuril-Kamchatka and Northern Japan subduction zones. *Geodynamics & Tectonophysics*, 11(4): 743–755. doi:10.5800/GT-2020-11-4-0504

References

- Safonov D.A., Semenova E.P. **2023**. Seismicity of the South Far East of Russia in 2022. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 7(2): 132–148. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.132-148>
- Safonov D.A., Semenova E.P. **2022**. Regional magnitude M_w in the Russian Far East. *Seismic Instruments*, 58(Suppl 1): S42–S57. <https://doi.org/10.3103/S074792392207009X>
- Sokos E., Zahradník 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>
- Safonov D.A., Kononov A.V. **2017**. Moment tensor inversion in the Kuril-Okhotsk and Sakhalin regions using ISOLA software. *Tikhookeanskaya geologiya*, 36(3): 102–112. (In Russ.). URL: http://itig.as.khb.ru/POG/2017/n_3/PDF_3_17/102-112.pdf
- Richter C.F. **1958**. *Elementary seismology*. New York: Freeman and Co., 768 p.
- Safonov D.A. **2024**. [Transitional relations for the energy characteristics of earthquakes in the Kuril-Okhotsk region]. *Voprosy inzhenernoj seismologii = Issues of Engineering Seismology*, 51(2): 102–117. (In Russ.).
- Rautian T.G. **1964**. [On determining the energy of earthquakes at distances up to 3000 km]. In: *Eksperimental'naya seismika = Experimental seismic*. Moscow: Nauka Publ., p. 88–93. (Trudy IFZ AN SSSR; № 32(199)). (In Russ.).
- Solov'yov S.L., Solov'yova O.N. **1967**. [Correlation between the energy class and the magnitude of Kuril earthquakes]. *Fizika Zemli = Physics of the Earth*, 2: 13–23. (In Russ.).
- 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>
- Poplavskaya L.N. (ed.) **2006**. [Regional catalog of earthquakes on Sakhalin Island, 1905–2005]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 103 p. (In Russ.).
- Kim Ch.U., Andreeva M.Yu. **2009**. [Earthquake catalog of the Kuril-Kamchatka region (1737–2005)]. Preprint. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 126 p.
- 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.).
- Tikhonov I.N., Kim Ch.U. **2010**. Confirmed prediction of the 2 August 2007 M_w 6.2 Nevelsk earthquake (Sakhalin Island, Russia). *Tectonophysics*, 485(1–4): 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.12.002>
- Prytkov A.S., Safonov D.A., Polets A.Yu. **2018**. Model of the Source of the $M_w = 5.8$ Onor Earthquake, August 14, 2016, Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology*, 12(5): 443–449. <https://doi.org/10.1134/S1819714018050093>
- Safonov D.A. **2020**. Reconstruction of the tectonic stress field in the deep parts of the Southern Kuril-Kamchatka and Northern Japan subduction zones. *Geodynamics & Tectonophysics*, 11(4): 743–755. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0504>

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 25.04.2024

Принята к публикации 07.06.2024

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 the Seismic station «Yuzhno-Sakhalinsk», Sakhalin Branch of the Federal Research Center “United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”, Yuzhno-Sakhalinsk, semenova@seismo.sakhalin.ru

Received 25 April 2024

Accepted 7 June 2024

© Авторы 2024 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2024. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 550.343(571.642)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.091-103>
<https://www.elibrary.ru/idofpc>

Проявления геомагнитной активности (солнечные вспышки и магнитные бури) в изменении электротеллурических потенциалов по данным измерений на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне

A. S. Zakupin[@], N. S. Stovbun, S. A. Gulyakov, A. I. Kazakov, I. P. Dudchenko

^{@E-mail:} a.zakupin@imgg.ru

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

Резюме. Представлены результаты анализа изменений электротеллурических потенциалов (ЭТП) на Сахалине во время вспышечных солнечных событий высоких классов и магнитных бурь с высоким индексом. Изучены данные в период с 20 июля по 12 октября 2023 гг. Показано отсутствие характерных изменений ЭТП (интегрального усиления или ослабления шума в низкочастотной области) в зависимости от наличия или отсутствия вспышечного события. В то же время в некоторых случаях обнаружены совпадения сильнейших вспышек с появлением сигналов типа GUV (Geysers type ULF Variation). В течение почти трех месяцев наблюдалось пять квазипериодических серий GUV, четыре из которых совпадают полностью или частично со временами вспышек и магнитных бурь. Отметим, что ранее в литературе появление этих сигналов не соотносилось с каким-либо физическим процессом. В то же время выявление подобных закономерностей является неотъемлемой частью большой работы по выделению в ЭТП прогностических признаков подготовки землетрясений.

Ключевые слова: серия электрических сигналов, вспышка на солнце, теллурические потенциалы, магнитная буря, GUV

The manifestations of geomagnetic activity (solar flares and magnetic storms) in the change of electrotelluric potentials according to measurements at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site

Aleksander S. Zakupin[@], Nikolai S. Stovbun, Sergei A. Gulyakov,

Artem I. Kazakov, Ilya P. Dudchenko

^{@E-mail:} a.zakupin@imgg.ru

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

Abstract. The results of the analysis of changes in electrotelluric potentials (ETP) during the observation of intense solar flare events and intense magnetic storms on Sakhalin are presented. The data were studied in the period from July 20 to October 12, 2023. The absence of characteristic changes in the ETP (integral amplification or attenuation of noise in the low-frequency region) depending on the presence or absence of a solar flare event is shown. At the same time, in some cases, the strongest flashes were found to coincide with the appearance of signals of the GUV type (Geysers type ULF Variation). For almost three months of observations, five cases of quasi-periodic GUV series have been identified, four of which coincide completely or partially with the times of solar flares and magnetic storms. It should be noted that earlier in the

The full text of this article in English can be found on the website of the «Geosystems of Transition Zones» journal:
<http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2024-2-2.pdf>

literature, the appearance of these signals was not correlated with any physical process. At the same time, the identification of such patterns is an integral part of extensive work on identifying predictive signs of earthquake preparation in the ETP.

Keywords: a series of electrical signals, solar flare, telluric potentials, magnetic storm, GUV

Для цитирования: Закупин А.С., Стовбун Н.С., Гуляков С.А., Казаков А.И., Дудченко И.П. Проявления геомагнитной активности (солнечные вспышки и магнитные бури) в изменении электротеллурических потенциалов по данным измерений на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 2, с. 91–103. <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.091-103>; <https://www.elibrary.ru/idofpc>

For citation: Zakupin A.S., Stovbun N.S., Gulyakov S.A., Kazakov A.I., Dudchenko I.P. The manifestations of geomagnetic activity (solar flares and magnetic storms) in the change of electrotelluric potentials according to measurements at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 2, pp. 91-103. (In Russ. & in Engl.). URL: <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2024-2-2.pdf>; <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.091-103>

Благодарности

Авторы благодарят уважаемых рецензентов за внимание к данной работе и конструктивные замечания.

Acknowledgements

The authors thank the respected Reviewers for their attention to this paper and constructive comments.

Введение

Механизмы взаимодействия между Землей и окружающим ее макрокосмосом, между геосферами и внутри каждой из них определяются разнообразием геофизических полей и их природой. Электрическое поле Земли представляет особый интерес для исследований, поскольку электрические эффекты не только оказывают значительное влияние на ход природных явлений и процессов, но также значимы для современного человека при организации производственно-технологических циклов [1]. В прикладной геофизике особое внимание уделяется электрическим полям регионального масштаба, поскольку они охватывают большие объемы прилегающих к поверхности участков земной коры и тропосферы, где и формируются условия для жизнедеятельности человека. Региональные поля электротеллурических токов являются сложными токовыми системами, образующимися под влиянием внешних и внутренних факторов. Существенное влияние на изменение составляющих поля электротеллурических токов оказывает корпускулярная радиация Солнца. В результате взаимодействия сверхзвукового солнечного ветра с магнитосферой и ионосферой возникают колебания электромагнитных полей от 0,0001 Гц до первых сотен герц.

Для инструментальных наблюдений за нестационарными переменными региональными электрическими полями земной коры используют метод теллурических токов и его модификации, теоретические основы которого

были заложены еще в 1930-х годах под руководством К. Шлюмберже [2]. В обобщенном виде установка для регистрации поля теллурических токов состоит из регистрирующей аппаратуры и двух пар электродов-заземлителей, располагаемых перпендикулярно. Несмотря на относительную простоту, сеть электротеллурических станций на Земле очень редкая [3].

В Сахалинской области постоянно действующих пунктов регистрации электротеллурического поля не было. В 2023 г. первый такой пункт начал работу в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН). К июню в институте был создан измерительный модуль, на базе которого развернут автономный пункт регистрации поля теллурических токов [4]. Почти за год непрерывной работы были накоплены значительные объемы данных, включающие в себя сигналы от разных источников, в том числе вызванные антропогенными факторами, поскольку наблюдения ведутся на территории института, расположенного в черте города Южно-Сахалинск. В преобладающем числе публикаций и пособий рекомендуют пункт регистрации располагать в районах с низким промышленным шумом [1, 5], но в эпоху стремительно развивающейся индустриализации-урбанизации без государственной поддержки реализовать это не просто. Однако известны случаи, когда подобного рода исследования успешно проводились и в городских условиях. Например, открытая в 1958 г. электротеллурическая станция расположена в г. Гурбаново на территории геомагнитной об-

серватории [6]. Обработку регистрируемых явлений в [6] проводили статистическим путем, классифицируя их по группам: 1) особые явления, 2) короткопериодические колебания (с периодом более 100 с), 3) бури, 4) возмущения. На основе обработанных результатов составляли бюллетени, в которых при помощи типовых обозначений указывали тип явления, качество, время начала и конца, максимальную амплитуду, средний (максимальный, минимальный) период [6]. Подобный подход актуален и сегодня, поскольку накопленный банк событий можно использовать совместно с алгоритмами искусственного интеллекта для автоматизации процесса обработки и поиска корреляций, например, с сейсмическими волнами. В работе [7] на основании результатов комплексного анализа, численного моделирования, лабораторных и полевых испытаний с применением существующих мировых технологических методик авторы предлагают решения для реализации электрического мониторинга при наблюдении за инженерно-геологическими процессами в условиях городских и промышленных районов.

С учетом изложенного представляет интерес анализ данных теллурического мониторинга пункта наблюдений ИМГиГ ДВО РАН с целью поиска возможных корреляций с магнитными бурями от вспышечных событий на Солнце. Отметим, что эти события не всегда совпадают и определяющими следует считать геомагнитные индексы, но обсерватории есть далеко не везде, а потому стоит включать в рассмотрение наряду с планетарным индексом Кр и моменты вспышек высоких классов. Подобного рода анализ недавно проводился авторами работы [8] для г. Якутск в период большой магнитной бури 07–09.09.2017 г. Обнаружен достаточно высокий коэффициент корреляции 0.5–0.9. Такой же высокий показатель корреляции был получен с использованием методики, описанной в работе [9], при исследовании влияния геомагнитно-индуцированных токов на электрические сети района Камчатки [10].

В отличие от перечисленных работ, при которых в составе измерительной установки были магнитометры, на нашем пункте возможны только электрические диполи. Несмотря на это, считаем целесообразным такое исследо-

вание выполнить. Одним из мотивов является применение новых подходов в регистрации и обработке данных. Так, в нашей недавней работе [4] было показано, что существенное увеличение частоты дискретизации при измерении электротеллурического потенциала (ЭТП) позволяет обнаружить сигналы, которые ранее было просто невозможно зарегистрировать. Более того, благодаря новым решениям в электротеллурических наблюдениях были установлены, предположительно, корреляции между квазипериодическими сериями таких сигналов и землетрясением в ближней зоне [4]. Это сделало возможным по-иному взглянуть на получаемые данные и обратить внимание на другие взаимосвязанные процессы, что в комплексе может внести вклад в решение задачи прогноза землетрясений. Опираясь, в том числе, и на глубокий обзор состояния исследований в геоэлектрике, опубликованный совсем недавно В.А. Пилипенко [12], можем констатировать актуальность нашей работы, несмотря на небольшие, с точки зрения геофизиков, периоды наблюдений.

Данные

Данные электротеллурических измерений

Электротеллурические измерения на полигоне ИМГиГ ДВО РАН – это измерения на новом уровне, с учетом достижений современной науки в области приборостроения и программ обработки длинных временных рядов. До этого исследование ЭТП проводилось в режиме полевых измерений и имело ряд практических недостатков. О новой концепции, аппаратурной и программной компонентах комплекса ЭТП-измерений, а также первых результатах подробно написано в работе [4]. Отметим ключевые аспекты аппаратурных решений – это быстродействующие аналого-цифровые преобразователи, минимальные аппаратурные шумы и высокая частота дискретизации. В обработке, естественно, применяются математические пакеты (на данный момент зарубежные), которые могут производить построение и быстрое преобразование Фурье (FFT, Fast Fourier Transform), фильтрацию временных рядов в десятки миллионов отсчетов. Данные измерений ЭТП представлены отдельными пакетами текстового

формата, где размещены измерения по трем каналам (три диполя NS, WE, NWSE), произведенные с частотой дискретизации 300 Гц. Исходя из максимально возможного количества отсчетов для обработки в пакете Origin Pro 92 млн, один пакет может вмещать записи измерений нескольких суток. База данных ЭТП-измерений включает непрерывные записи с 20.07.2023 г. по настоящее время. В этой работе для анализа мы выбрали данные по дате последней записи в каталоге вспышек (см. ниже), т.е. по 12.10.2023 г. Данные предварительно отфильтровали полосовым фильтром 0.01–1 Гц. Отметим, что этот шаг значительно повышает качество анализа, ведь в высокочастотной области довольно много помех, а уровень шума для широкополосного сигнала в 4 раза превышает шум фильтрованного сигнала в полосе от 0.01 до 1 Гц.

Данные по вспышечным событиям на Солнце

Для анализа был использован накопительный каталог солнечных вспышечных событий рентгеновского класса M1–X > 17.5 XXV цик-

ла солнечной активности (I.2020 – VI.2030, <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-FE-03>), который размещен в открытом доступе (автор В.Н. Ишков, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН; Геофизический центр РАН). Каталог скачан в версии 5 (октябрь 2023 г.), и, соответственно, последние данные в нем датируются 12 октября 2023 г. Для нашего исследования были использованы записи с 20.07.2023 г., т.е. с момента начала регистрации ЭТП на полигоне ИМГиГ ДВО РАН. В данной работе мы сфокусировали наше внимание на вспышках большой мощности, которые способны вызывать заметные ионосферные возмущения. В табл. 1 показаны те немногие события класса M с индексом 5 и более, которые были зафиксированы с 20 июля по 12 октября 2023 г. Время приведено в формате UTC для удобства сопоставления (для получения местного, сахалинского времени необходимо добавить 11 ч).

Как видно из табл. 1, выделяются три периода активности, причем 5 из 6 событий приходится на два из них – с 5 по 7 августа и с 20

Таблица 1. Солнечные вспышечные события рентгеновского класса от M5 с 20 июля по 12 октября 2023 г.
Table 1. X-ray-class solar flare events from M5 from July 20 to October 12, 2023

Date, dd.mm.yyyy	Time, h:m			Class, X-ray/opt	$L (J \cdot m^{-2})$
	t_0	t_m	t_e		
05.08.2023	21:45	22:21	22:44	X1.6	0.3
06.08.2023	18:20	18:40	19:11	M5.5/SN	0.06
07.08.2023	20:30	20:46	21:18	X1.5	0.28
03.09.2023	08:09	08:36	08:56	M6.0	0.064
20.09.2023	14:11	14:19	14:25	M8.2	0.036
21.09.2023	12:42	12:54	13:02	M8.7	0.001

Примечания. Date (dd.mm.yyyy) – дата реализации солнечного вспышечного события. Time (UTC): t_0 , t_m , t_e – время начала, максимума, конца полного вспышечного события соответственно; вспышки в H α (спектральная линия серии Бальмера атома водорода) и всплеска в диапазоне мягкого рентгена (1–8 Å = 12.5–1 кэВ). t_0 и t_e определяются, соответственно, по более раннему началу и по более позднему концу в этих диапазонах, t_m – по всплеску в рентгене. Если наблюдается только рентгеновский всплеск, то конец события определяется по точке спада на половину интенсивности от I_{max} до фона. Class: X-ray/opt – рентгеновский класс и оптический балл вспышечного события. $L (J \cdot m^{-2})$ – интегральный поток в стандартном рентгеновском диапазоне от начала всплеска через максимум до 1/2 максимальной интенсивности.

Notes. Date (dd.mm.yyyy) of implementation of the solar flare event. Time (UTC): t_0 , t_m , and t_e indicate the time of the beginning, maximum, and end of the full flare event, respectively; a flare in H α (spectral line of the Balmer series of the hydrogen atom) and a burst in the soft X-ray range (1–8 Å = 12.5–1 keV). Accordingly, t_0 and t_e are determined by the earlier start and later end in these ranges, t_m – by the burst in X-rays. If only an X-ray burst is observed, then the end of the event is determined by the point where the intensity decreases by half from I_{max} to the background. Class: X-ray/opt – is X-ray class and optical score of the flare event. $L (J \cdot m^{-2})$, – integral flux in the standard X-ray range from the beginning of the burst through the maximum to 1/2 of the maximum intensity.

по 21 сентября. Одно событие, причем самое слабое (M6), приходится на 3 сентября. Наиболее выделяется первый период с двумя вспышками X-класса. Еще можно отметить невысокую интенсивность потока от событий 20 и 21 сентября при их достаточно высоком классе.

Данные по магнитным бурям

В качестве источника данных был использован интернет-проект «Лаборатория солнечной астрономии» Института космических исследований РАН и Института солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН (https://xras.ru/magnetic_storms.html). Лаборатория в открытом доступе предоставляет информацию о геомагнитной активности Земли и солнечных явлениях. Данные представлены в гистограммах, содержащих информацию о динамике изменения планетарного Kp-индекса. На основе данного индекса расчи-

тана шкала G интенсивности геомагнитного шторма. Из архива были выбраны и сведены в таблицу данные о магнитных бурях индекса G1 и выше в период с 20.07 по 12.10.2023 г. За данный период наблюдалось 9 магнитных бурь, 7 из которых уровня G1, 2 – уровня G2 (табл. 2). В таблицу внесен период максимума активности каждой бури и соответствующее ему значение Kp-индекса. На рис. 1 мы демонстрируем 6 периодов, в которые попали 9 магнитных бурь из табл. 2.

Корреляции между солнечными вспышками и магнитными бурями – очень сложная тема, это задача отдельных исследований специалистов. При простом сопоставлении солнечных вспышек и магнитных бурь четкая связь не просматривается. Даже первые записи из табл. 1 и 2 вызывают вопросы. В данной работе мы этих вопросов не касаемся.

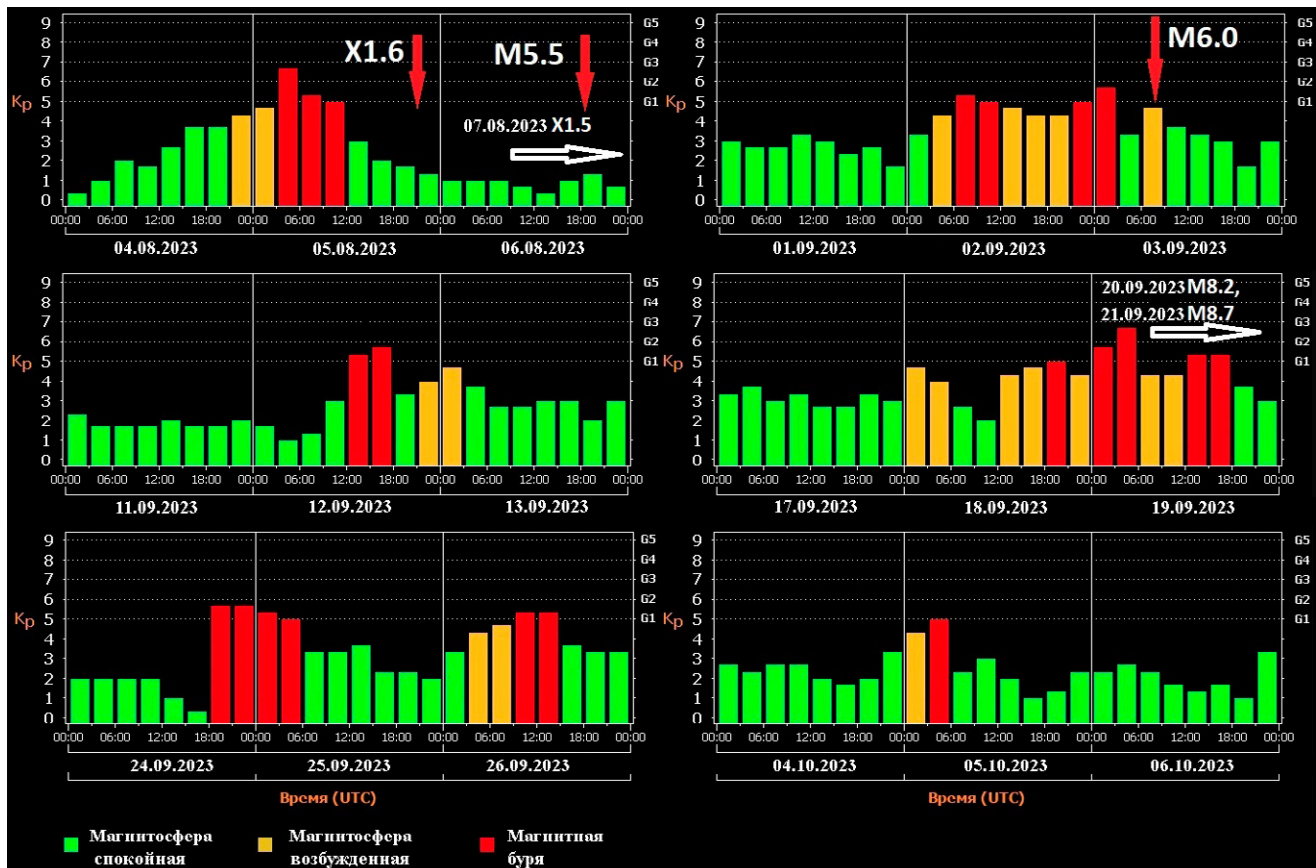


Рис. 1. Периоды с магнитными бурями, у которых G-индекс больше или равен 1, с 20.07 по 12.10.2023. Стрелками показаны моменты вспышек из табл. 1. Интенсивность магнитной бури: G1 – слабая, G2 – средняя, G3 – сильная, G4 – очень сильная, G5 – экстремально сильная.

Fig. 1. Periods with magnetic storms for which the G-index is greater than or equal to 1, from July 20 to October 12, 2023. The arrows show the flash points from Table 1. The intensity of the magnetic storm: G1, weak; G2, medium; G3, strong; G4, very strong; G5, extremely strong.

Таблица 2. Магнитные бури с 20.07 по 12.10.2023
Table 2. Magnetic storms from July 20 to October 12, 2023

№	Date, dd.mm.yyyy	Time, h:m			G-index	Kp-index
		Start	Maximum	End		
1	05.08.2023	01:00	01:00–07:00	13:00	G2	6.67
2	02.09.2023	04:00	04:00–10:00	13:00	G1	5.33
3	02–03.09.2023	19:00	22:00–04:00	04:00	G1	5.67
4	12.09.2023	10:00	13:00–19:00	19:00	G1	5.67
5	18–19.09.2023	16:00	01:00–07:00	07:00	G2	6.67
6	19.09.2023	10:00	Absent	19:00	G1	5.33
7	24–25.09.2023	16:00	16:00–01:00	07:00	G1	5.67
8	26.09.2023	07:00	Absent	16:00	G1	5.33
9	05.10.2023	01:00	Absent	07:00	G1	5

Наша цель – сопоставить вариации ЭТП с моментами возникновения солнечных вспышек, а затем с магнитными бурями. Заметим, что сопоставление данных с магнитными бурями, конечно, имеет гораздо больший физический смысл, чем с солнечными вспышками, впрочем, это не лишает смысла и интереса сопоставление всех трех явлений одновременно.

Результаты

Для демонстрации больших периодов времени по ЭТП, в которые попадали солнечные вспышки и на которых можно было бы оценить продолжительное влияние магнитных бурь, были подготовлены нарезки данных ЭТП длительностью по 3–4 дня (рис. 3). Эти нарезки не всегда заканчиваются целыми сутками, но четко следуют по времени друг за другом. В целом удалось вставить в каждые три графика около 10 сут. На всех далее представленных графиках с вариациями ЭТП соблюдается единый масштаб для каждого канала и, кроме того, нанесены ключевые события (вспышки и землетрясения). Графики ориентированы на периоды, которые охватывают все события из табл. 1 и большинство событий из табл. 2. Несмотря на то что анализ возможной связи сейсмичности с вариациями ЭТП не входит в задачи данного сообщения (это задача дальнейших исследований), считаем полезным показать на графиках значимые землетрясения (с $M > 3$), которые произошли в пределах измеритель-

ного полигона (в радиусе 25–30 км). Список таких землетрясений представлен в табл. 3, а карта сейсмичности в период с 20.07 по 12.10.2023 – на рис. 2.

На рис. 2 и в табл. 3 приведены локальные магнитуды. Динамика сейсмичности за такой весьма короткий промежуток времени не выделяется чем-то особенным, а вот два землетрясения с $M > 3$ для окрестности полигона явление очень редкое, что отмечено нами в работе [4]. Итак, рассмотрим данные ЭТП (рис. 3).

Первый период вспышечной активности (рис. 3 А) совпадает с одним из знаковых событий нашего первого исследования [4] – землетрясением 08.08.2023 с $M = 3.8$.

Заметим попутно, что на рис. 3 А хорошо видны ночные серии сигналов, которые в исследовании [4] были обнаружены нами с 20.07 по 11.09.2023 и наблюдались каждые сутки на всем периоде. В [4] отмечалось, что в этот период ночные серии квазипериодических импульсов меняли параметры перед сейсмическим событием в районе полигона (09.08.2023) и после него. И на наших графиках этот ключевой момент как раз оказался запечатлен. Мы видим нарастание и стабилизацию амплитуды сигналов, а затем, уже после землетрясения, нарушение целостности сигналов, составляющих серии. Два самых сильных вспышечных события за период в 82 дня происходят за сутки и трое суток перед одним из двух сильнейших землетрясений в исследуемом райо-

не. Это, несомненно, интересное наблюдение и даже предмет будущего исследования, задача же данной работы – определение возможного влияния вспышек на изменение теллурических потенциалов. При детальном рассмотрении вариаций ЭТП на всех каналах и всем периоде времени (рис. 3) нам не удалось обнаружить заметного увеличения количества или амплитуды вариаций, равно как и сигналов определенной формы или периодичности (или квазипериодичности, как в ночных сериях).

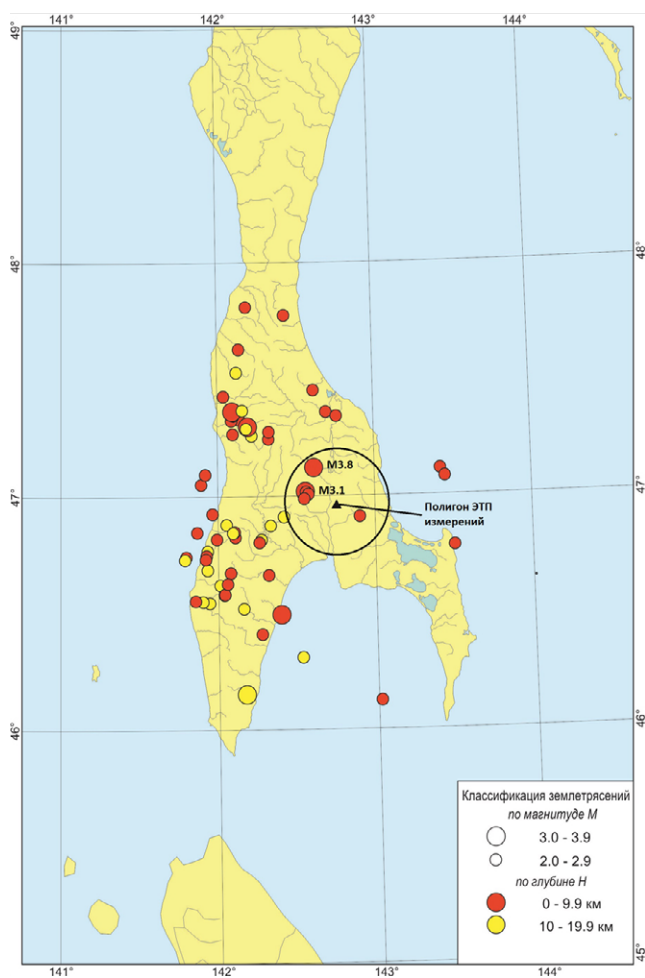


Рис. 2. Карта сейсмичности юга о. Сахалин с 20.07 по 12.10.2023 г.

Fig. 2. Seismicity map of the south of Sakhalin Island from July 20 to October 12, 2023

Таблица 3. Землетрясения с $M > 3$ в радиусе 0.25° от пункта измерений

Table 3. Earthquakes with $M > 3$ within a radius of 0.25° from the measurement point

Date, dd.mm.yyyy	Time, h:m:s	Coordinates	Depth, km	Magnitude, M
08.08.2023	18:14:34	47.02°N 142.56°E	6	3.8
18.09.2023	15:49:33	47.12°N 142.61°E	9	3.1

На рис. 3 С показан период с 31.08 по 09.09.2023, в котором произошла вспышка, по классу близкая к нижней границе выбранного нами диапазона, однако по интенсивности излучения сопоставимая со вспышками более высокого класса (табл. 1).

Этот период также примечателен тем, что в нем ночные серии сигналов уже значительно потеряли силу (на канале NS их уже не видно). Напомним, что эти серии после 11.09.2023 (до 01.05.2024) не регистрировались нами более. Однако в этих графиках внимание привлекает усиление уровня сигнала 3 сентября. На канале WE мы поместили это событие как GUV. Отметка GUV выбрана не случайно. Аббревиатура переводится как Geysier type ULF Variation. Такое название сигналы на ультра-низких частотах получили из-за сходства временного изменения электрической силы с изменением высоты воды в гейзере [11]. Впрочем, в работе [11] не раскрывается их связь с каким-либо физическим явлением.

На нашем графике мы видим не просто усиление шумовой компоненты, а квазипериодическую серию типичных GUV сигналов (увеличенный фрагмент показан на рис. 4). В работе [4] мы упоминали о том, что подобные сигналы есть в наших измерениях, правда, тогда мы не ставили задачу выяснить их происхождение или выявить какие-либо корреляции с другими явлениями. Как видно на рис. 4, сигналы GUV у нас идут с переменной полярностью, их амплитуда на канале NS около 5 мВ, длительность около 5 с, а период по однополярным сигналам около 95 с.

Всего серия длилась около 6 ч и началась приблизительно через 14 ч после солнечной вспышки. Последние вспышки из табл. 1 произошли также в сентябре 2023 г. (рис. 3 D).

В этот же период наблюдалось второе землетрясение из табл. 3, которое произошло

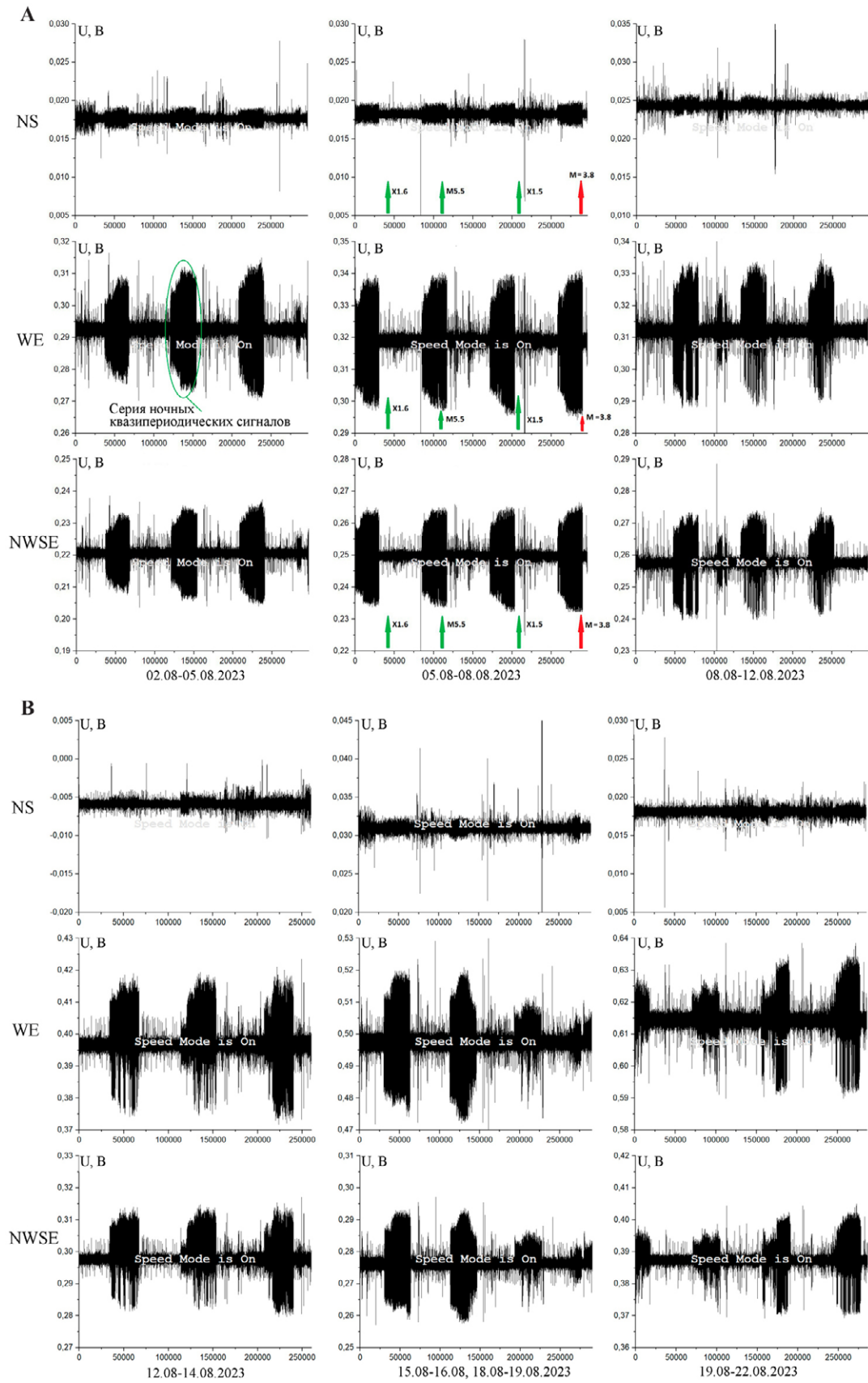


Рис. 3. Изменение потенциала на диполях NS, WE и NWSE в периоды: (A) 02.08–12.08.2023; (B) 12.08–16.08 и 18.08–22.08.2023; (C) 31.08.2023 – 09.09.2023; (D) 15.09–23.09.2023. Зелеными стрелками показаны моменты вспыхивающих событий (t_0) и их класс, красной стрелкой – землетрясение с указанием магнитуды. Красным контуром и символом GUV отмечена серия квазипериодических сигналов.

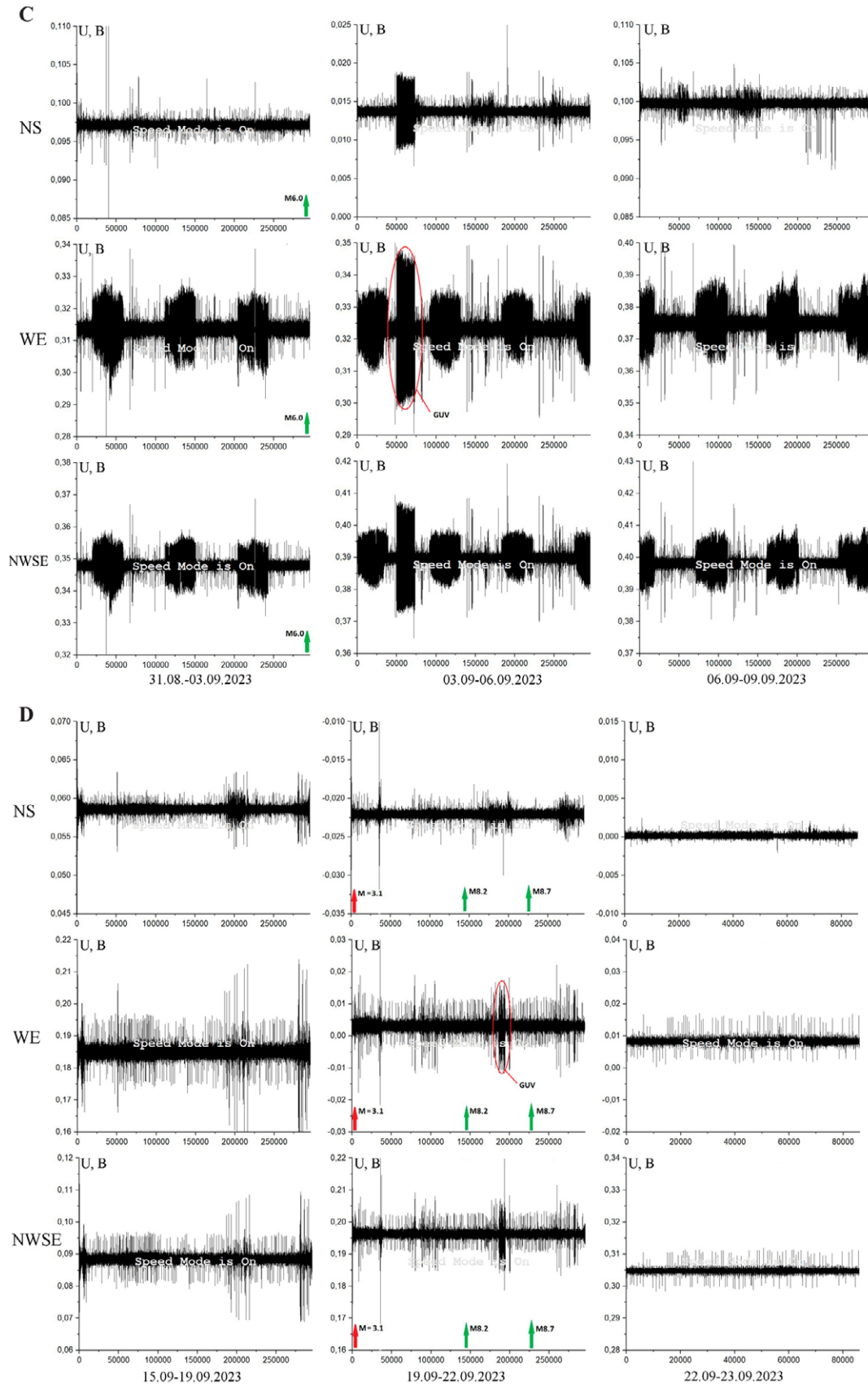


Fig. 3. Potential changes on the NS, WE, and NWSE dipoles: (A) 02.08–12.08.2023; (B) 12.08–16.08 and 18.08–22.08.2023; (C) 31.08.2023 – 09.09.2023; (D) 15.09–23.09.2023. Green arrows show the moments of flare events (t_0) and their class. A series of quasi-periodic signals is marked with a red outline and the GUV symbol.

в 15 ч 19.09.2023 (UTC) и имело магнитуду $M = 3.1$. Однако первое событие оказалось точно после двух бурь X-класса, а вот второе произошло за сутки до двух вспышек класса M8. На графиках можно отметить существенное понижение уровня вариаций и их количества через сутки после последней вспышки. Однако самое интересное – это обнаружение серии GUV-сигналов (серия отмечена на канале WE, рис. 3 D) 21 сентября, которые хоть и значительно слабее, чем 3 сентября (на канале NS сигналы вообще неразличимы), но выделяются надежно (рис. 4).

Серия обнаружена через 12 ч после первого вспышечного события 21 сентября и дли-

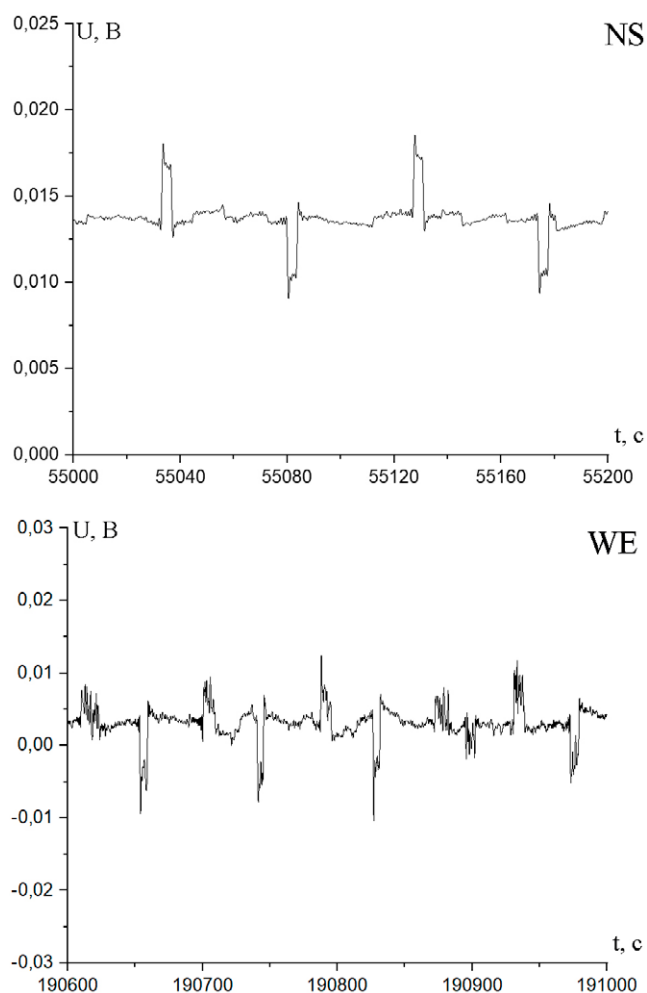


Рис. 4. Фрагменты изменения потенциала на канале NS 3 сентября 2023 г. (верхний график) и на канале WE 21 сентября 2023 г. Представлены отдельные сигналы типа GUV, составляющие квазипериодические серии.

Fig. 4. Fragments of potential changes on the NS channel on September 3, 2023 (upper graph) and on the WE channel on September 21, 2023. Separate GUV type signals are presented, which make up quasi-periodic series.

лась всего около 2 ч. Это уже второй случай, и, несмотря на то что после вспышек X-класса в начале августа (рис. 3 C) подобного не обнаружено, следует поговорить об этом подробнее. Мы это сделаем позже, но сначала предлагаем рассмотреть сопоставимый по времени отрезок, когда активность солнца была на минимуме (рис. 3 B), т.е. отсутствовали вспышки, а геомагнитный индекс был в зеленой зоне ($Kp < 4$).

Детальный анализ графиков показал, что каких-то заметных изменений в вариациях ЭТП по сравнению с предыдущими периодами не отмечается. Заметим, что продолжается деградация ночных серий, которые начали нарушаться с 10 августа. Также не отмечается никаких иных квазипериодических серий сигналов определенной и устойчивой формы, подобных GUV.

Теперь рассмотрим периоды времени, когда были зарегистрированы сильнейшие магнитные бури. Все 9 магнитных бурь удалось показать на 6 трехдневных периодах (рис. 1). Как следует из таблиц 1 и 2, а также из графиков на рис. 1, почти во всех случаях магнитные бури опережают солнечные вспышки. А, например, 12, 24–26 сентября и 5 октября, когда были зафиксированы магнитные бури, значимых вспышек не наблюдалось вовсе. Мы проанализировали данные ЭТП и в эти периоды. Ничего нового в связи с прохождением бурь мы не обнаружили, кроме уже знакомых серий сигналов GUV. Сразу отметим, что графики ЭТП для магнитных бурь, которые не попали на рисунки, равно как и схожие графики новых серий GUV, мы приводить не будем, так как результаты идентичны.

Вернемся к вопросу о возможной связи GUV с геомагнитными проявлениями. Данные за весь период исследования от 20 июля до 12 октября 2023 г. были рассмотрены детально именно с этой целью, т.е. все три канала по-суточно масштабировались в поисках наличия сигналов GUV. Заметим, что работа была проделана объемная, учитывая время загрузки в математический пакет суточных файлов, где содержатся записи по трем каналам с частотой дискретизации 300 Гц, и необходимость мас-

Таблица 4. Параметры серий GUV
Table 4. Parameters of GUV series

№	Date (dd.mm.yyyy) and time (h:m)		T (с)	t (с)	A(NS), B	A(NWSE), B	A(WE), B	Channels
	Start	End						
1	03.09.2023 22:25	04.09.2023 4:31	87 с	4.21	0.00451	0.0173	0.0241	NS, WE, NWSE
2	21.09.2023 2:14	21.09.2023 4:24	82 с	5.3	–	0.0108	0.0126	WE, NWSE
3	25.09.2023 1:02	25.09.2023 5:12	82 с	4.23	0.0015	0.012	0.015	NS, WE, NWSE
4	02.10.2023 1:30	02.10.2023 5:00	85 с	4.64	0.00195	0.0104	0.0117	NS, WE, NWSE
5	05.10.2023 3:55	05.10.2023 4:51	86 с	4.24	0.00239	0.0106	0.017	NS, WE, NWSE

Примечание. T – период между сигналами одинаковой полярности, t – длительность импульса, A – амплитуда импульса.
Note: T, period between signals of the same polarity; t, pulse duration; A, pulse amplitude.

штабирования пакетами по несколько десятков минут. Итоги данной работы представлены в табл. 4.

Всего серии сигналов типа GUV были отмечены пять раз, и в двух случаях они появлялись через 12–14 ч после вспышечного события (табл. 4, № 1, 2; рис. 3 C, D). В среднем серии длятся несколько часов, самая короткая около 1 ч и самая длинная почти 6 ч. Амплитуда и длительность импульсов, а также период между ними меняются незначительно. По отношению к дням недели избирательности нет. Начало появления серий разное, а вот окончание – в 15–17 ч по сахалинскому времени. Период между сигналами GUV в наших измерениях почти вдвое короче периода между сигналами, которые мы фиксировали в ночное время в августе–сентябре [4], но сопоставимы с ними по длительности импульса и амплитуде. Если сравнить данные таблиц 2 и 4, то появляется дополнительная информация. Рассмотрим каждую серию GUV отдельно.

1. Начинается 3 сентября в 22:25 после магнитных бурь № 2 и № 3, фактически через 12 ч после окончания бурь и появления вспышки.

2. Начинается 21 сентября в 2:14, в то время как магнитные бури закончились к вечеру 19 сентября (табл. 2, № 5, 6), а 20 и 21 сентября произошли вспышки M8.2 и M8.7.

3. Серия 25 сентября четко коррелирует с магнитной бурей № 7 из табл. 2, причем не только по дате, но и попадает в ее промежуток по времени. При этом вспышек в этот период нет.

4. Серия 2 октября не совпадает с какими-либо событиями.

5. Серия 5 октября четко коррелирует с бурей № 9 (табл. 2) не только по дате, но и по времени. Вспышек в этот период нет.

Получается, что четыре из пяти серий GUV коррелируют с магнитными бурями и/или вспышками. Причем у данной корреляции весьма интересные особенности. В 1-м и 2-м случаях есть задержка, но там есть и опережение бурями моментов вспышек. При отсутствии вспышки магнитные бури идеально совпадают с сериями GUV. Есть две бури, которые не сопровождались сериями сигналов – это 5 августа и 12 сентября. Такой результат заставляет думать о том, что корреляции если и существуют, то они как минимум нелинейные.

Итак, судя по полученным результатам, есть некоторые совпадения между вариациями ЭТП, вспышками на Солнце, а также магнитными бурями. Предположительно, эти связи в ЭТП проявляются как серии сигналов GUV. Безусловно, по данным всего трех месяцев измерений в зоне с большим уровнем помех преждевременно делать вывод о том, что магнит-

ные бури и серии GUV действительно имеют явную связь. Мы только хотели бы обратить внимание на то, в какой форме это предположительное влияние может проявиться. Многие с недоверием относились к ночным сериям сигналов [4], которые появлялись как бы мгновенно и прекращались таким же образом. Теперь же мы увидели серии типа GUV, которые хоть и наполнены сигналами иной формы, но с точностью повторяют поведение ночных серий (квазипериодичность, резкое появление), а самое главное, возможно, коррелируют с источником, который мог бы их сгенерировать, – вариациями в магнитосфере Земли.

Заключение

В данной работе рассмотрены изменения электротеллурических потенциалов на геофизическом полигоне Института морской геологии и геофизики ДВО РАН в Южно-Сахалинске в периоды, когда имели место вспышечные события на Солнце высоких классов и/или магнитные бури. Интегральное усиление или ослабление теллурического шума при вспышечных событиях, а также во время прохождения магнитных бурь в низкочастотном спектре не обнаружено. Для некоторых событий были обнаружены совпадения с появлением в ЭТП квазипериодических серий сигналов типа GUV (Geysers type ULF Variation). При этом для самых сильных событий X-класса таких серий не зарегистрировано. Также выявлены серии GUV, которые регистрировались в отсутствие вспышек, но при наличии магнитной бури. Всего четыре из пяти серий сигналов GUV совпадали полностью или частично с бурями и вспышками. На данном этапе исследований можно предположить, что есть вероятность обнаружить при анализе большего объема данных корреляции между вспышечными событиями высоких классов (от M5), магнитными бурями (G1 и более) и вариациями ЭТП. Мы полагаем, что данная работа явится дополнительным стимулом для использования предложенных новых аппаратурных решений в задаче поиска предвестников землетрясений в вариациях ЭТП.

Список литературы

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. **2014**. *Физические поля в приповерхностной геофизике*. М.: ГЕОС, 360 с.
2. Дахнов В.Н. **1937**. *Теллурические токи и пути изучения их с целью проведения разведок полезных ископаемых*. М.: ГОНТИ, 56 с.
3. Волкова Е.Н. **2008**. *Физика Земли*. Ч. I. Саратов: Научная книга, 88 с.
4. Закупин А.С., Дудченко И.П., Богомолов Л.М., Гуляков С.А., Казаков А.И., Стовбун Н.С. **2024**. Кратковременные вариации электротеллурического поля вблизи очага землетрясения на о. Сахалин. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 46(1): 134–164. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164>; EDN: FIGWJO
5. Мойланен Е.В., Пушкарев П.Ю., Шустов Н.Л. **2013**. Предварительные результаты глубинного магнитотеллурического зондирования на геофизической базе МГУ в Калужской области. *Записки Горного института*, 200: 65–70.
6. Kraččovič S., Marquart P. **1961**. Электротеллурическая станция в Гурбанове. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 5(4): 373–375. <https://doi.org/10.1007/bf02585409>
7. Богданов М.И., Калинин В.В., Модин И.Н. **2013**. Применение высокоточных низкочастотных электроразведочных комплексов для ведения длительного мониторинга опасных инженерно-геологических процессов. *Инженерные изыскания*, 10–11: 110–115.
8. Козлов В.И., Баишев Д.Г. **2018**. Вариации естественных электрических потенциалов в Якутске. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 5(25): 55–61. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-55-61>
9. Сивоконь В.П., Сероветников А.С., Писарев А.В. **2011**. Высшие гармоники как индикатор геомагнитно-индуцированных токов. *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*, 3: 30–34. EDN: MQABAV
10. Сероветников А.С., Сивоконь В.П. **2013**. Геомагнитно-индуцированные токи в электроэнергетических системах. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2(7): 24–32.
11. Fujinawa Y., Noda Y. **2020**. Progress of applied seismo-electromagnetism. *Open Journal of Earthquake Research*, 9(1): 1–18. <https://doi.org/10.4236/ojer.2020.91001>
12. Pilipenko V.A., Shiokawa K.A. **2024**. Closer cooperation between space and seismology communities – a way to avoid errors in hunting for earthquake precursors. *Russian Journal of Earth Sciences*, 24(1): 1–22. <https://doi.org/10.2205/2024ES000899>

References

1. Adushkin V.V., Spivak A.A. **2014**. [*Physical fields in near-surface geophysics*]. Moscow: GEOS, 360 p. (In Russ.).
2. Dakhnov V.N. **1937**. [*Telluric currents and ways to study them for the purpose of mineral exploration*]. Moscow: GONTI, 56 p. (In Russ.).
3. Volkova E.N. **2008**. [*Physics of the Earth*]. Pt I. Saratov: Nauchnaya kniga, 88 p. (In Russ.).
4. Zakupin A.S., Dudchenko I.P., Bogomolov L.M., Gulyakov S.A., Kazakov A.I., Stovbun N.S. **2024**. Short temporal variations of electrotelluric field in the vicinity of the earthquake source-site in the Sakhalin Island. *Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki = Bull. of KRAESC. Physical and Mathematical Sciences*, 46(1): 134–164. (In Russ.). <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164>; EDN: FIGWJO
5. Moilanen E.V., Pushkarev P.Yu., Shustov N.L. **2013**. Preliminary results of deep magnetotelluric sounding at the geophysical base of Moscow State University in the Kaluga region. *Journal of Mining Institute*, 200: 65–70.
6. Krajčovič S., Marquart P. **1961**. Electrotelluric station in Gurbanov. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 5(4): 373–375. <https://doi.org/10.1007/bf02585409>
7. Bogdanov M.I., Kalinin V.V., Modin I.N. **2013**. Application of high-precision low-frequency electrical exploration complexes for long-term monitoring of hazardous engineering-geological processes. *Inzhenernye izyskaniya*, 10–11: 110–115. EDN: RMTVIH
8. Kozlov V.I., Baishev D.G. **2018**. Variations of natural electrical potentials at Yakutsk. *Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki = Bull. of KRAESC. Physical and Mathematical Sciences*, 5(25): 55–61. (In Russ.). <https://krassec.ru/ru/kozlov-525/>
9. Sivokon V.P., Serovetnikov A.S., Pisarev A.V. **2011**. Higher harmonics as an indicator of geomagnetic-induced currents. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'*, 3: 30–34. EDN: MQABAV
10. Serovetnikov A.S., Sivokon V.P. **2013**. Geomagnetic-induced currents in electrical power systems. *Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki = Bull. of KRAESC. Physical and Mathematical Sciences*, 2(7): 24–32. (In Russ.).
11. Fujinawa Y., Noda Y. **2020**. Progress of applied seismo-electromagnetism. *Open Journal of Earthquake Research*, 9(1): 1–18. <https://doi.org/10.4236/ojer.2020.91001>
12. Pilipenko V.A., Shiokawa K.A. **2024**. Closer cooperation between space and seismology communities – a way to avoid errors in hunting for earthquake precursors. *Russian Journal of Earth Sciences*, 24(1): 1–22. <https://doi.org/10.2205/2024ES000899>

Об авторах

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

Закупин Александр Сергеевич (<https://orcid.org/0000-0003-0593-6417>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмологии, a.zakupin@imgg.ru

Стовбун Николай Сергеевич (<https://orcid.org/0009-0004-1927-798X>), младший научный сотрудник, nikolay19972016@gmail.com

Гуляков Сергей Александрович (<https://orcid.org/0009-0001-7924-6972>), младший научный сотрудник, gulyakov_97@mail.ru

Казakov Артем Иванович (<https://orcid.org/0000-0002-1378-185X>), ведущий инженер, legn@inbox.ru

Дудченко Илья Павлович (<https://orcid.org/0000-0002-4967-7405>), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, руководитель отдела исследования геофизических полей и физических свойств геоматериалов, ilpadu@mail.ru

Поступила 19.04.2024

Принята к публикации 04.06.2024

About the Authors

Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Zakupin, Alexander S. (<https://orcid.org/0000-0003-0593-6417>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Laboratory of seismology, a.zakupin@imgg.ru

Stovbun, Nikolai S. (<https://orcid.org/0009-0004-1927-798X>), Junior Researcher, nikolay19972016@gmail.com

Gulyakov, Sergei A. (<https://orcid.org/0009-0001-7924-6972>), Junior Researcher, gulyakov_97@mail.ru

Kazakov, Artem I. (<https://orcid.org/0000-0002-1378-185X>), Leading Engineer, legn@inbox.ru

Dudchenko, Ilya P. (<https://orcid.org/0000-0002-4967-7405>), Cand. Sci. (Technology), Senior Researcher, Head of the Department of research of geophysical fields and physical properties of geomaterials, ilpadu@mail.ru

Received 19 April 2024

Accepted 4 June 2024

© Автор 2024 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author 2024. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК [551.7:551.311.8](571.642)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.104-113>
<https://www.elibrary.ru/jjlpzq>

Стратиграфическая привязка крупнообломочного материала из отложений Южно-Сахалинского грязевого вулкана

A. A. Verkhoturov

E-mail: ussr-91@mail.ru

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

Резюме. Одной из принципиально важных задач при изучении генезиса и глубинного строения грязевых вулканов является определение источника извергаемого материала, а также глубин его изначального расположения – так называемых корней. Цель настоящей работы – отразить первые результаты стратиграфической привязки твердых выбросов Южно-Сахалинского грязевого вулкана. В результате полевых работ была сформирована коллекция каменного материала, отобранного из отложений грязевого вулкана, а также из естественных обнажений характерных для района исследования стратиграфических подразделений. По литологическим признакам среди крупнообломочного материала в составе выбросов Южно-Сахалинского грязевого вулкана выделяются песчаники, алевролиты, глинисто-карбонатные и карбонатные породы. Наиболее многочисленная группа фрагментов горных пород представлена песчаниками, различными по своим структурно-текстурным характеристикам. Получены первые подтверждения, что очаг грязевого вулкана выходит за традиционно принятые границы быковской свиты. Предварительные результаты стратиграфической привязки крупнообломочного материала демонстрируют наибольшее сходство литологических характеристик с отложениями нижнебыковской подсвиты и найбинской свиты, что свидетельствует в пользу локализации основного источника (очага грязевого вулкана) извергаемого крупнообломочного материала в интервале глубин 2500–3500 м. Обнаружены подтверждения включения в грязевулканический процесс пород кайнозойского возраста.

Ключевые слова: грязевой вулкан, очаг грязевого вулкана, Центрально-Сахалинский разлом, стратиграфическая привязка, стратиграфические подразделения, горные породы

Stratigraphic control of large detrital rocks of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano

Alexey A. Verkhoturov

E-mail: ussr-91@mail.ru

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

Abstract. One of the crucial tasks in studying the genesis and deep structure of mud volcanoes is to determine the origin of the erupted material and the depth of its original location, the so-called roots. The purpose of this study was to present the first results of stratigraphic control of solid emissions from the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano with local stratigraphic units. As a result of field work, a collection of rock material sampled from the mud volcano deposits and natural outcrops of the stratigraphic units typical of the study area has been compiled. According to lithological characteristics, sandstones, siltstones, clay-bearing carbonate, and carbonate rocks have been identified among the large detrital rocks in the solid emissions of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano. The largest group of rock fragments was represented by the sandstone, which was different in its structural and textural characteristics. The first confirmations have been obtained that the mud volcano chamber extends beyond the traditionally accepted boundaries of the Bykov Formation. The preliminary results of stratigraphic control of large detrital rocks indicate the highest lithological similarity with the deposits from the Lower Bykov Subformation and Naiba Formation, suggesting that the main source (mud volcano chamber) of the erupted large detrital rocks lies within the depth range of 2,500 to 3,500 meters. Evidence of Cenozoic rock inclusion in the mud volcano process has also been found.

Keywords: mud volcano, mud volcano chamber, Central Sakhalin Fault, stratigraphic control, stratigraphic units, rocks

Для цитирования: Верхотуров А.А. Стратиграфическая привязка крупнообломочного материала из отложений Южно-Сахалинского грязевого вулкана. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 2, с. 104–113. <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.104-113>; <https://www.elibrary.ru/jjlpzq>

For citation: Verkhotur A.A. Stratigraphic control of large detrital rocks of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 2, pp. 104–113. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.104-113>; <https://www.elibrary.ru/jjlpzq>

Введение

Исследование грязевого вулканизма имеет как теоретическое, так и практическое значение. Извержения грязевых вулканов традиционно помогают оценить углеводородный потенциал недр [1, 2]. В составе грязевулканических брекчий стали отмечать ранее неизвестные самородные минералы [3, 4]. Активность грязевых вулканов тесно связана с сейсмичностью территорий, где они расположены [5–8]. Однако в отношении природы грязевых вулканов остается еще много вопросов, особенно в области их генезиса и глубинного строения [9].

Для Южно-Сахалинского грязевого вулкана (рис. 1) одной из трудно решаемых задач является определение источника извергаемого вещества (или очага грязевого вулкана), а также глубин расположения так называемых корней.

Стоит отметить, что в научной среде термины «очаг» и «корни» грязевых вулканов пока не определены с надлежащей строгостью, вследствие чего часто используются как синонимы. В настоящем исследовании будем придерживаться принципиальной схемы глубинного строения грязевых вулканов, предложенной авторами атласа грязевых вулканов мира [10], где под очагом понимается зона тек-

тонического дробления горных пород со скоплениями флюидов, питающих вулкан. В свою очередь термин «корень» отражает глубину зарождения грязевулканического процесса и тесно связан с уровнями генерации углеводородных газов [11].

О глубинах, с которых поступают на поверхность продукты извержения грязевых вулканов, в основном судят на основе применения современных сейсмических методов [12, 13], геохимических исследований жидких и газобразных флюидов [14, 15]. Не является оригинальным и метод стратиграфической привязки твердых выбросов [16], применяемый автором настоящей работы.

По устоявшимся представлениям о глубинном строении Южно-Сахалинского грязевого вулкана (ЮСГВ), основной очаг не распространяется за пределы отложений позднего мела (быковская свита (K_2bk)) [17]. В этом случае, учитывая местоположение грязевого вулкана и мощность быковской свиты в 2.5 км, глубину расположения очага можно оценить в 2–2.5 км. Оценка глубины залегания очага, установленная на основании температур генерации грязевулканических вод, рассчитанных по различным гидрохимическим геотермометрам, составляет 2–4 км [18], однако более надежным признается Mg-Li гео-



Рис. 1. Местоположение объекта исследования.

Fig. 1. Location of the study site.

термометр, по которому устанавливаются более узкий диапазон – 2–2.5 км [4]. Моделирование конечного сферического источника показало вероятную глубину источника извержения в 700 м, и авторы работы [19] делают вывод, что этот источник является близповерхностным промежуточным резервуаром, отвечающим за слабые извержения. Согласно данным по изотопии углерода [9] и результатам математического моделирования [20], глубина источника газа оценивается в 8–9 км, что, вероятно, соответствует глубине проникновения корней ЮСГВ. В мировой практике глубины расположения корней грязевых вулканов оценивают в 5–25 км [21, 22].

Проведенные на ЮСГВ сейсмические исследования на основе методов преломленных и отраженных волн позволили судить о приповерхностном (до 1000 м) строении постройки грязевого вулкана, а также установить взаимосвязь промежуточных флюидосодержащих камер с тектоническими нарушениями [23].

Цель настоящей работы – изложить первые результаты привязки твердых выбросов Южно-Сахалинского грязевого вулкана к местным стратиграфическим подразделениям.

Материал (объект) и методы исследования

В исследовании использованы комплекты государственных геологических карт масштаба 1:1 000 000 (первого–третьего поколений) и 1:200 000 (первого и второго поколений): ГГК-1000-І¹, ГГК-1000-ІІ², ГГК-1000-ІІІ³, ГГК-200-І⁴, ГГК-200-ІІ⁵. Анализировались результаты геологических (включая собственные), геофизических и геохимических исследований, проведенных в изучаемом районе, включая фондовые источники (<https://efgi.ru/>). Каменный материал отбирали из отложений ЮСГВ и естественных обнажений в ходе про-

ведения маршрутных обследований на грязевом вулкане и прилегающих к нему районах.

Стратиграфическая привязка крупнообломочных отложений ЮСГВ выполнялась на основе сопоставления их с собранной эталонной коллекцией горных пород местных стратиграфических подразделений.

Характеристика района исследования

Район ЮСГВ характеризуется довольно сложным геологическим строением (рис. 2). В структурном плане грязевой вулкан приурочен к Западно-Сахалинскому резко асимметричному антиклинорию, нарушенному крупнейшим на Сахалине разломом, известным как Центрально-Сахалинский или Тымь-Поронайский взбросо-надвиг. Нарушение представляет собой широкую разломную зону (до 10 км), плоскость сместителя наклонена на запад под углом 60–80°, а амплитуда смещения оценивается в 3–4 км [24]. С этим важнейшим элементом дизъюнктивной тектоники связывают образование и активность грязевого вулкана. Помимо Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР) выделяют множество второстепенных оперяющих нарушений.

Местные стратиграфические подразделения относятся к временному интервалу от раннего мела до плейстоцена. Однако на восточном крыле антиклинория отложения палеоген-неогенового возраста представлены в значительно сокращенном виде. Так, из разреза выпадают отложения олигоцена (снежинкинская, краснопольевская, такарадайская свиты) и миоцена (невельская, верхнедуйская, сертунайская, курасийская свиты). При удалении от ЦСР на запад и восток углы падения осадочных толщ становятся более пологими. К западу от ЦСР углы падения составляют от 40–60° в быковской свите до 15° в невельской, к востоку – от 70–80° в холмской свите до 10° в маруямской.

¹ Государственная геологическая карта СССР. 1959. Масштаб 1:1 000 000. Лист L-54 – Южно-Сахалинск. Сост. Берсенев И.И., Саяпина Л.М.; ред. Красный Л.И. М.: Картогр. фабрика Госгеолтехиздат.

² Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1994. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист L-(53), 54; K-55 – Южно-Сахалинск. Сост. Безверхний В.Л., Берсенев В.П., Ротман В.К., Святогорова И.Н.; ред. Ротман В.К. СПб.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ.

³ Государственная геологическая карта Российской Федерации. 2021. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист L-(53), 54 – Южно-Сахалинск. Ред. Коваленко С.В., Лопатин Б.Г., Супруненко О.И.; ВНИИОкеанология, Дальневост. ПГО, ВСЕГЕИ, Сахалинская геологоразведочная экспедиция. СПб.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ.

⁴ Государственная геологическая карта СССР. 1966. Масштаб 1:200 000. Сахалинская серия. L-54-X, XI – Луговое. Сост. Семенов Д.Ф.; ред. Верещагин В.Н. М.: Фабрика № 9.

⁵ Государственная геологическая карта Российской Федерации. 2001. Масштаб 1:200 000. Сахалинская серия. Изд. 2-е. Лист L-54-X, XI – Луговое. Сост. Жаров А.Э., Гальверсен В.Г.; ред. Ротман В.К. СПб.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ.

Взгляды на геологическое строение района изменяются по мере накопления фактических материалов по результатам геологических съемок, геофизических, геохимических и буровых работ. Весьма неоднозначные мнения сложились относительно толщи терригенных пород, которая граничит с отложениями быковской свиты на западе и отложениями холмской свиты на востоке. В «Геологии СССР» 1970 г. [24] эта толща выделена как гастелловская свита, хотя и отмечено ее сходство с аракайской свитой. На ГГК-200-I и ГГК-1000-II эти толщи отнесены к аракайской свите, а авторами ГГК-200-II выделены в ту-

найчинскую свиту. На актуальной ГГК-1000-III эти отложения объединены с холмской свитой, и в пояснительной записке обосновывается несостоятельность ранее выделенной тунайчинской свиты. При этом выдвинуто сомнительное предположение о принадлежности этой толщи к фрагментам выклинивающейся снежинкинской свиты, в то время как, по имеющимся геологическим сведениям, выходы этой свиты к востоку от ЦСР не отмечались. О.А. Мельников здесь выделял формацию слабосцементированных неяснослоистых песчаников, песчанистых алевролитов и аргиллитов, а также вулканитовую дацит-анде-

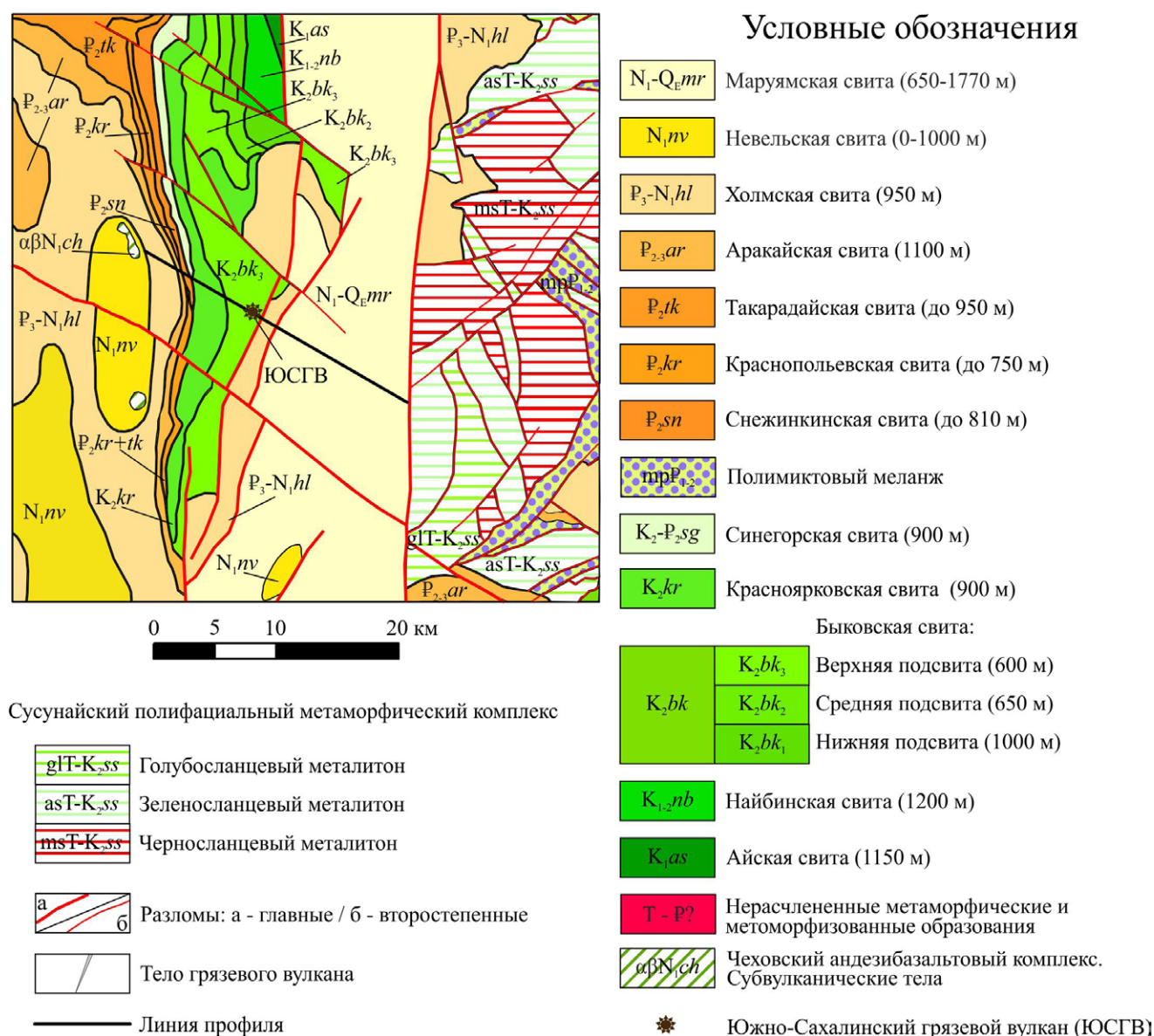


Рис. 2. Карта геологического строения района Южно-Сахалинского грязевого вулкана по ГГК-1000-III, с изменениями.

Fig. 2. Geological structure map of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano area according to SGM-1000-III, revised.

зитовую формацию, которые сопоставлялись с гасстелловской и аракайской свитами соответственно [17]. Согласно актуальной ГГК-1000-III, осадочные отложения к востоку от ЦСР до контакта с маруямской свитой будем соотносить с холмской свитой.

Анализ геологических карт и разрезов района исследования позволяет предположить генетическую связь ЮСГВ со следующими местными стратиграфическими подразделениями: холмская (P_3-N_1hl), красноярковская (K_2kr), быковская (K_2bk), найбинская ($K_{1-2}nb$), айская (K_1as) свиты.

Результаты и обсуждение

В результате многократных обследований ЮСГВ была сформирована коллекция крупнообломочного материала, отобранного из отложений вулкана [25]. Существующих описаний горных пород, характерных для местных стратиграфических подразделений исследуемого района, недостаточно для выполнения достоверной стратиграфической привязки. Поэтому в районе ЮСГВ был проведен также ряд маршрутных обследований со сбором эталонной коллекции образцов горных пород из обнажений вышеперечисленных стратиграфических подразделений.

По литологическим признакам среди крупнообломочных отложений ЮСГВ выделяются песчаники, алевролиты, глинисто-карбонатные и карбонатные породы. Наиболее многочисленная группа представлена песчаниками, различающимися по структурно-текстурным характеристикам.

Широко распространены песчаники светло-серые с серишной и направленно изменяющейся горизонтальной слоистостью, реже наблюдается волнистая текстура. По размеру частиц – средне- и мелкозернистые, иногда встречается резкий переход к крупнозернистому песчанику с включением гравия и глинистых окатышей. Характерная особенность часто встречающихся песчаников – послойные скопления углефицированного растительного детрита (рис. 3а). На опорном разрезе меловых отложений данная особенность в единичных случаях фиксировалась в красноярковской и быковской свитах, наиболее типична она для отложений найбинской свиты [26], что было отмечено и в ходе пройденных маршрутов в нижних и верхних горизонтах $K_{1-2}nb$.

Крупные обломки неплотных песчаников средне- и мелкозернистых, светло-серых и светло-коричневых оттенков встречаются не менее часто. Обычно в них наблюдается

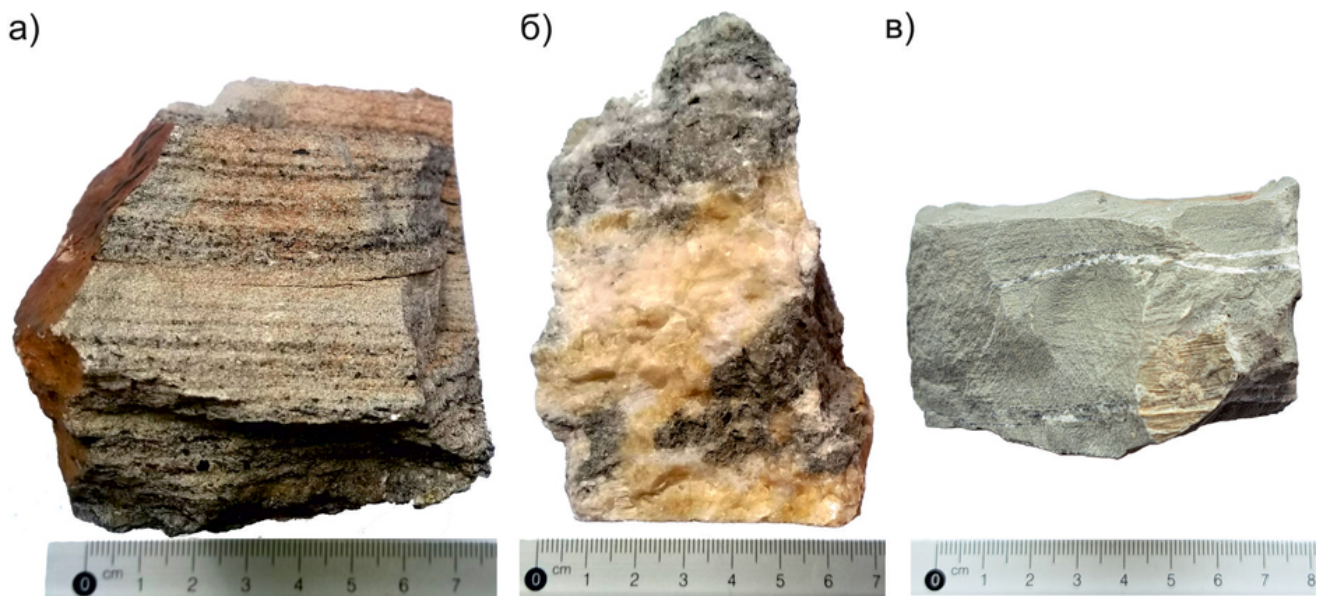


Рис. 3. Обломки горных пород из отложений ЮСГВ: (а) песчаник с послойным скоплением углефицированного растительного детрита, (б) глинисто-карбонатная брекчия, (в) алевролит.

Fig. 3. Rock fragments from the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano sediments: (a) sandstone with layered accumulation of carboniferous detritus, (b) clayey-carbonate breccia, (c) siltstone.

неотчетливая, реже равномерная горизонтальная слоистость. Фрагменты углефицированного растительного детрита встречаются в единичных образцах. Подобные песчаники с горизонтальной слоистостью наиболее характерны для верхней части найбинской свиты. Примечательно, что при отделении от скального массива они нередко образуют округлую (валунную) отдельность, и подобные фрагменты встречены в отложениях ЮСГВ в большом количестве (рис. 4).

Отдельно можно выделить песчаники серые, среднезернистые, массивные, плотные, крепкие. Схожие породы наблюдаются в отложениях как найбинской свиты, так и холмской.

Алевролиты и аргиллиты быковской и найбинской свит имеют характерную пепельную окраску и легко поддаются выветриванию, поэтому в грязевулканических отложениях их крупные обломки встречаются единично. Породы темно-серые, серые и серо-коричневые тонкослоистые. В ряде образцов наблюдаются включения песчаного материала и углефицированного растительного детрита. Лучше сохранились кремнистые алевролиты

(рис. 3в), схожие с алевролитами быковской (темно-серые) и холмской (серо-коричневые) свит. Наличие среди твердых продуктов извержений пород кайнозойского возраста также отмечается в работе [4]. Встречаемые в отложениях ЮСГВ округлые обломки галечной размерности алевролитов были отмечены в нижней части нижнебыковской подсвиты.

Среди крупных обломков весьма распространены карбонатные породы. Можно выделить глинисто-карбонатные брекчии (рис. 3б), фрагменты карбонатных жил, а также, вероятно, обломки глинисто-карбонатных конкреций, наличие которых характерно для многих стратиграфических комплексов исследуемого района. Вероятно, часть собранных фрагментов является аутигенными карбонатами, непосредственно образованными в специфических физико-химических условиях грязевулканической системы [27]. Глинисто-карбонатные образования сложной текстуры встречены в нижней части нижнебыковской подсвиты. Несомненный интерес, заслуживающий отдельного исследования, представляют глинисто-карбонатные брекчии. В нескольких

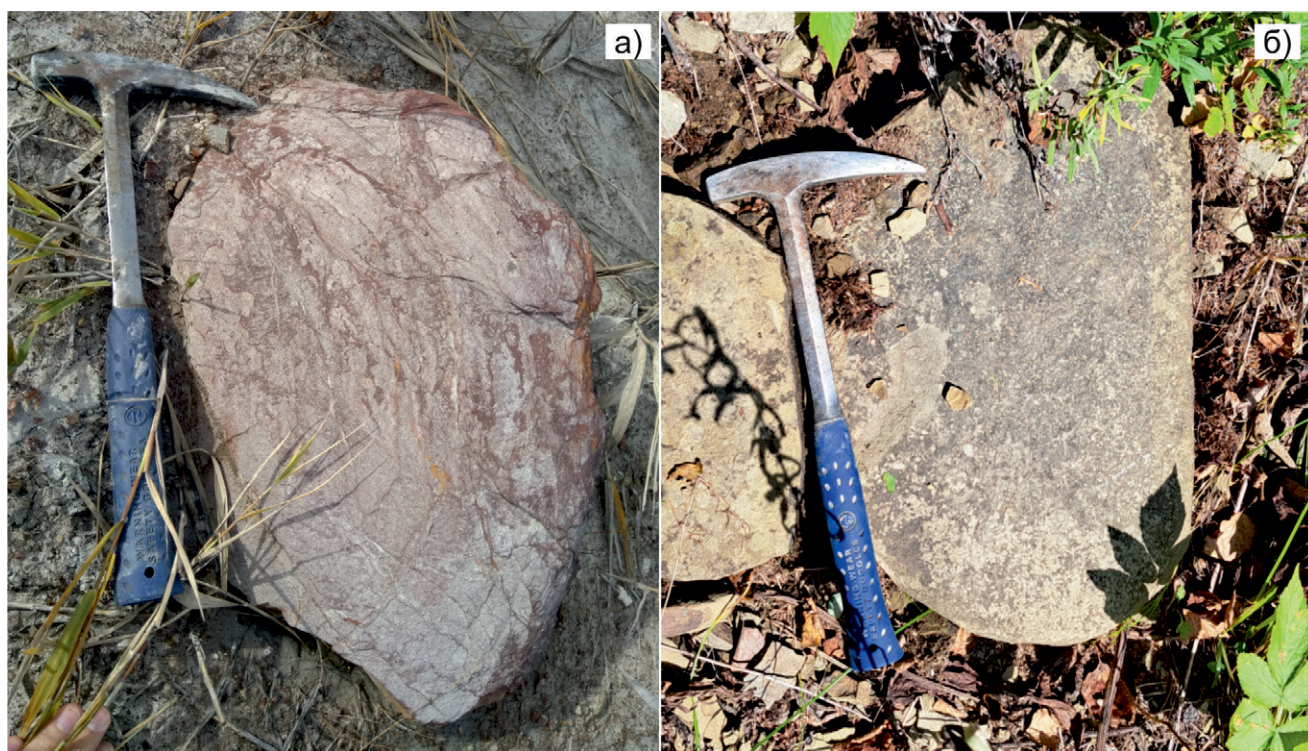


Рис. 4. Валунные отдельности песчаника: (а) в отложениях ЮСГВ, (б) в обнажениях верхненайбинской подсвиты.

Fig. 4. Sandstone boulders: (a) in the sediments of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano, (b) in the outcrops of the Upper Naiba Subformation.

образцах при определении химического состава методом рентгенофлюоресцентного анализа с использованием анализатора THERMO Niton XL3t были обнаружены высокие концентрации золота – от 17 до 70 ppm.

Фрагменты осадочных горных пород, которые можно было бы соотнести с разрезом нижнего мела (K_{1as}), а также метаморфические и метаморфизованные породы (Т-Р?) в грязевулканических отложениях обнаружены не были. Единичные обломки пород палеоген-неогенового возраста (холмской свиты), вероятно, привносятся из приповерхностной (с глубины до 400 м) грязевой камеры, захватывающей отложения холмской свиты, которые примыкают к главному сместителю ЦСР с востока.

Анализ собранных материалов позволяет предположить расположение основного очага грязевого вулкана (область разжижения и наибольшей раздробленности горных пород) в интервале нижебыковская подсвита – найбинская свита (рис. 5). Корни же грязевого вулкана, представляющие собой систему каналов, благоприятную для миграции флюидов, по всей видимости, уходят значительно глубже. Авторы сейсмической модели южного Сахалина [28] считают, что в интервале 5–15 км под ЮСГВ продолжается в западном направлении сусунайский блок (Т-Р?) и отмечается широкая зона надвиговой нарушенности, ассоциируемой с ЦСР. Ниже сусунайского блока отмечается существование поднадвигового блока богатых углеводородами отложений, которые могут быть одним из источников флюидов.

Несколько иные результаты, указывающие на положение источника газа и очага грязе-

зевого вулкана (в оригинальной статье были использованы термины «разуплотненный блок» и «резервуар»), получил коллектив авторов [29], исследовавших строение осадочного чехла в районе Пугачевского грязевого вулкана (ПГВ), который по геолого-тектоническим условиям во многом схож с ЮСГВ. Так, исходя из интерпретации материалов геоплотностного и геотермического моделирования, очаг ПГВ расположен в интервале глубин 4.8–6.3 км, что соответствует положению айской свиты (нижний мел). K_{1as} является и основным источником углеводородных газов. Ранее проведенные исследования на ПГВ отмечают приуроченность обломков горных пород к быковской свите [24], что указывает на стратиграфическую близость положения основного источника извергаемого крупнообломочного материала у обоих грязевых вулканов. В то же время пока еще остается дискуссионным вопрос о глубинах источника образования газа.

Заключение

Предварительные результаты стратиграфической привязки крупнообломочных отложений ЮСГВ показывают наибольшую литологическую сходимость их с отложениями нижебыковской подсвиты и найбинской свиты, что в совокупности с интерпретацией геологической информации позволяет предполагать положение основного источника (очага грязевого вулкана) извергаемого крупнообломочного материала в интервале глубин 2500–3500 м.

Корни грязевого вулкана, по которым мигрируют газ и вода, по всей видимости, имеют более глубокое проникновение. Разными

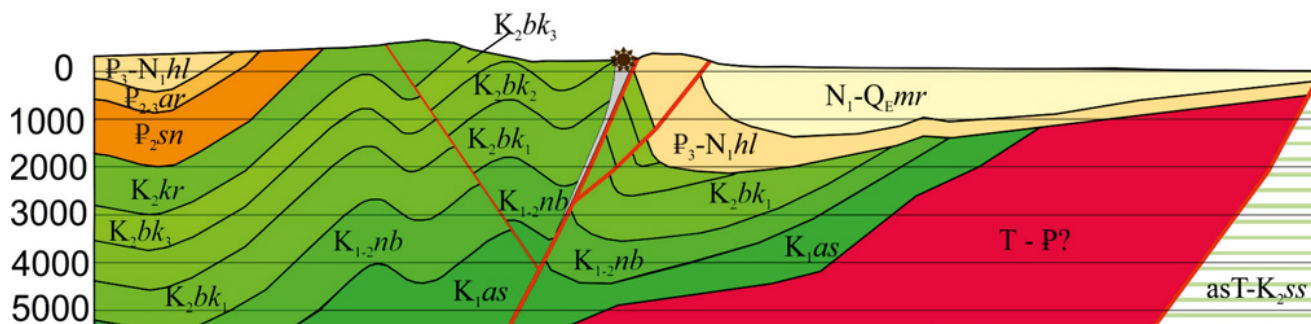


Рис. 5. Схематический геологический разрез района ЮСГВ (положение профиля и условные обозначения приведены на рис. 2).
Fig. 5. Cross section of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano area (profile position and symbols are shown in Fig. 2).

группами исследователей, на основе применения геохимических и геофизических методов, приводятся оценки глубины источника газа в очень широком диапазоне – от 8–9 км, что может соответствовать метаморфическим и метаморфизованным породам сусунайского блока, и глубже 15 км, где предполагается наличие богатых углеводородами осадочных отложений.

Перспективы дальнейшего исследования связаны с выполнением комплекса лабораторных работ по изучению петрографического состава, содержания петрогенных, редких и редкоземельных элементов, а также микрофауны в отобранных образцах горных пород, что должно показать обоснованность выдвинутой гипотезы о положении очага грязевого вулкана.

Список литературы

1. Якубов А.А., Григорьянц Б.В., Алиев Ад.А. и др. **1980.** *Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтегазоносностью.* Баку: Элм, 167 с.
2. Алиев Ад.А. **1999.** Грязевые вулканы как источник информации о нефтегазоносности больших глубин. *Труды ИГАН, 27:* 50–63.
3. Шнюков Е.Ф., Сокол Э.В., Нигматулина Е.Н., Иванченко В.В., Юшин А.А. **2013.** Золото в грязевых вулканах Керченского полуострова как показатель глубинности грязевулканических флюидов. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 4(34):* 79–89.
4. Sokol E.V., Kokh S.N., Nekipelova A.V., Abersteiner A., Seryotkin Y.V., Ershov V.V., Nikitenko O.A., Deviatiarova A.S. **2021.** Ge-Hg-Rich sphalerite and Pb, Sb, As, Hg, and Ag sulfide assemblages in mud volcanoes of Sakhalin Island, Russia: An insight into possible origin. *Minerals, 11:* 1186. <https://doi.org/10.3390/min11111186>
5. Mellors R., Kilb D., Aliyev A., Gasanov A., Yetirmishli G. **2007.** Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions. *J. of Geophysical Research, 112(B4):* B04304. <https://doi.org/10.1029/2006JB004489>
6. Bonini M. **2009.** Mud volcano eruptions and earthquakes in the Northern Apennines and Sicily, Italy. *Tectonophysics, 474(3-4):* 723–735. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.05.018>
7. Rukavicková L, Hanzl P. **2008.** Mud volcanoes in the Khar Argalantyn Nuruu, NW Gobi Altay, Mongolia as manifestation of recent seismic activity. *Journal of Geosciences, 53:* 181–191. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.024>
8. Рахманов Р.Р. **1979.** Особенности грязевулканических проявлений подвижных складчатых областей земной коры. «Грязевой вулканизм». *Доклады АН Уз. ССР, 35(9):* 70–73.
9. Мельников О.А., Ершов В.В. **2010.** Грязевой (газоводолитокластитовый) вулканизм острова Сахалин: история, результаты и перспективы исследований. *Вестник ДВО РАН, 6:* 87–93.
10. Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Дадашев Ф.Г., Рахманов Р.Р. **2015.** *Атлас грязевых вулканов мира.* Баку: Nafta-Press, 322 с.
11. Kopf A.J. **2002.** Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics, 40 (10):* B1–B49. <https://doi.org/10.1029/2000RG000093>
12. Baghzendani H.R., Aghajani H., Soleimani M. **2015.** Subsurface modeling of mud volcanoes, using density model and analysis of seismic velocity. *Journal of Mining and Environment, 6(1):* 31–39.
13. Мердад С. **2016.** Получение улучшенных сейсмических изображений методом дифракционного суммирования для сложной структуры, содержащей грязевой вулкан, на юго-восточном побережье Каспийского моря. *Геология и геофизика, 57(12):* 2250–2263. <https://doi.org/10.15372/GiG20161210;EDN: XEJNAZ>
14. Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Каменский И.Л. **1996.** Источники вещества в продуктах грязевого вулканизма (по изотопным, гидрохимическим и геологическим данным). *Литология и полезные ископаемые, 6:* 625–647.
15. Холодов В.Н. **2002.** Грязевые вулканы: закономерности размещения и генезис. Сообщ. 2. Геолого-геохимические особенности и модель формирования. *Литология и полезные ископаемые, 4:* 339–358.
16. Авдусин П.П. **1948.** *Грязевые вулканы Крымско-Кавказской геологической провинции: петрографические исследования.* М.: Изд-во АН СССР, 192 с.
17. Мельников О.А. **2002.** Южно-Сахалинский газоводолитокластитовый («грязевой») вулкан – уникальный объект природы на Дальнем Востоке России. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 48 с.
18. Никитенко О.А. **2022.** Геохимическая характеристика и условия формирования вод наземных грязевых вулканов: региональные (на примере о. Сахалин) и глобальные закономерности: дис. ... канд. геол.-минер. наук. Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН.
19. Прытков А.С., Василенко Н.Ф., Ершов В.В. **2014.** Моделирование извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2011 г. по данным GPS наблюдений. *Тихоокеанская геология, 33(3):* 79–87. EDN: TBWTUX
20. Доманский А.В., Ершов В.В., Левин Б.В. **2009.** Математическая модель неустановившихся течений

- геофлюидов при грязевулканических процессах. *Доклады АН*, 424(1): 107–110. EDN: JVIPRT
21. Горбатиков А.В., Собисевич А.Л., Овсяченко А.Н. **2008**. Развитие модели глубинного строения Ахтырской флексурно-разрывной зоны и грязевого вулкана Шуго. *Доклады АН*, 421(5): 670–674. EDN: JHJIOP
 22. Собисевич А.Л., Горбатиков А.В., Овсяченко А.Н. **2008**. Глубинное строение грязевого вулкана горы Карabetова. *Доклады АН*, 422(4): 542–546. EDN: JRFWCT
 23. Жигулев В. В., Гуринов М. Г., Ершов В. В. **2008**. Глубинное строение Южно-Сахалинского грязевого вулкана по результатам комплексных сейсмических исследований. *Тихоокеанская геология*, 27(4): 16–21. EDN: LMCBAN
 24. Верещагин В.Н. (ред.) **1970**. *Геология СССР. Т. 33. Остров Сахалин. Геологическое описание*. М.: Недра, 432 с.
 25. Верхотуров А.А. **2022**. Крупнообломочные породы в отложениях Южно-Сахалинского грязевого вулкана. В кн.: *Геология на окраине континента: Материалы II молодежной науч. конф.-школы ДВГИ ДВО РАН, Владивосток, 12–16 сентября 2022 года*. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, с. 43–45.
 26. Пояркова З.Н. (ред.) **1987**. *Опорный разрез меловых отложений Сахалина (Найбинский разрез)*. Л.: Наука, 196 с.
 27. Ершов В.В., Перстнева Ю.А. **2018**. Литохимическая характеристика сопочной брекчии грязевых вулканов мира. *Отечественная геология*, 4: 72–83. EDN: XWBQWL
 28. Koulakov I., Serdyukov A.S., Kononov A.V., Mikhailov V.I., Safonov D.A., Duchkov A.A., Al-Arifi N., El Khrepy S. **2017**. Possible sources of hydrothermal activity and mud volcanism in southern Sakhalin inferred from local earthquake seismic tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(5): 1943–1958. <https://doi.org/10.1002/2017GC006820>
 29. Веселов О.В., Волгин П.Ф., Лютая Л.М. **2012**. Строение осадочного чехла Пугачевского грязевулканического района (о. Сахалин) по данным геофизического моделирования. *Тихоокеанская геология*, 31(6): 4–15.
- ## References
1. Yakubov A.A., Grigoryants B.V., Aliev A.A., et al. **1980**. [*Mud volcanism of the Soviet Union and its connection with oil and gas potential*]. Baku: Elm, 167 p. (In Russ.).
 2. Aliev A.A. **1999**. [Mud volcanoes as a source of information on the oil and gas potential of great depths]. [*Proceedings of the Institute of Geology of the Academy of Sciences of Azerbaijan*], 27: 50–63. (In Russ.).
 3. Shnyukov E.F., Sokol E.V., Nigmatulina E.N., Ivanchenko V.V., Yushin A.A. **2013**. Gold in mud volcanoes of the Kerch Peninsula as indicator of mud volcanic fluids deepness. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*, 4(34): 79–89. (In Russ.).
 4. Sokol E.V., Kokh S.N., Nekipelova A.V., Abersteiner A., Seryotkin Y.V., Ershov V.V., Nikitenko O.A., Deviatiiarova A.S. **2021**. Ge-Hg-Rich sphalerite and Pb, Sb, As, Hg, and Ag sulfide assemblages in mud volcanoes of Sakhalin Island, Russia: An insight into possible origin. *Minerals*, 11: 1186. <https://doi.org/10.3390/min11111186>
 5. Mellors R., Kilb D., Aliyev A., Gasanov A., Yetirmishli G. **2007**. Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions. *J. of Geophysical Research*, 112(B4): B04304. <https://doi.org/10.1029/2006JB004489>
 6. Bonini M. **2009**. Mud volcano eruptions and earthquakes in the Northern Apennines and Sicily, Italy. *Tectonophysics*, 474(3-4): 723–735. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.05.018>
 7. Rukavičková L, Hanzl P. **2008**. Mud volcanoes in the Khar Argalantyn Nuruu, NW Gobi Altay, Mongolia as manifestation of recent seismic activity. *Journal of Geosciences*, 53: 181–191. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.024>
 8. Rakhmanov R.R. **1979**. [Features of mud volcanic manifestations of mobile orogenic zones of the Earth's crust “Mud volcanism”]. *Doklady AN Az. SSR*, 35(9): 70–73. (In Russ.).
 9. Melnikov O.A., Ershov V.V. **2010**. Mud (gas-water-lithoclastite) volcanism of the Sakhalin Island: history, results and prospects in research. *Vestnik of the FEB RAS*, 6: 87–93. (In Russ.).
 10. Aliev Ad.A., Guliev I.S., Dadashev F.G., Rakhmanov R.R. **2015**. [*Atlas of the world mud volcanoes*]. Baku: Nafta-Press, 322 p. (In Russ.).
 11. Kopf A.J. **2002**. Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*, 40 (10): B1–B49. <https://doi.org/10.1029/2000RG000093>
 12. Baghzendani H.R., Aghajani H., Soleimani M. **2015**. Subsurface modeling of mud volcanoes, using density model and analysis of seismic velocity. *Journal of Mining and Environment*, 6(1): 31–39.
 13. Mehrdad S. **2016**. Seismic image enhancement of mud volcano bearing complex structure by the CDS method, a case study in se of the Caspian Sea shoreline. *Russian Geology and Geophysics*, 57(12): 2250–2263. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG20161210>
 14. Lavrushin V.Yu., Polyak B.G., Prasolov E.M., Kamensky I.L. **1996**. Sources of material in mud volcano products (based on isotopic, hydrochemical, and geological data). *Lithology and Mineral Resources*, 31: 557–578.
 15. Kholodov V.N. **2002**. Mud Volcanoes: Regularities of localization and genesis. Communication 2. Geological-

- geochemical features and formation model. *Lithology and Mineral Resources*, 4: 325–341.
16. Avdusin P.P. **1948**. [*Mud volcanoes of the Crimean-Caucasian geological province: petrographic studies*]. Moscow: AS USSR, 192 p. (In Russ.).
 17. Melnikov O.A. **2002**. *The Yuzhno-Sakhalinsk gas-water-lithoclastic (“mud”) volcano – a unique object of Nature in the Far East of Russian*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 48 p. (In Russ.).
 18. Nikitenko O.A. **2022**. [*Geochemical characteristics and conditions of waters of terrestrial mud volcanoes: regional (the case of Sakhalin Island) and global patterns*]: thesis of Cand. Sci. (Geology and Mineralogy). Yuzhno-Sakhalinsk, IMGG FEB RAS. (In Russ.).
 19. Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Ershov V.V. **2014**. Simulation of the 2011 South Sakhalin Mud Volcano eruption based on the GPS data. *Russian Journal of Pacific Geology*, 8(3): 224–231.
 20. Domanskii A.V., Ershov V.V., Levin B.V. **2009**. A mathematical model of unsteady flows of geofluids in mud volcanic processes. *Doklady Earth Sciences*, 424(1): 95–98.
 21. Gorbatikov A.V., Sobisevich A.L., Ovsyuchenko A.N. **2008**. Development of the model of the deep structure of Akhtyr flexure-fracture zone and Shugo Mud Volcano. *Doklady Earth Sciences*, 421(2): 969–973.
 22. Sobissevitch A.L., Gorbatikov A.V., Ovsuchenko A.N. **2008**. Deep structure of the mt. Karabetov mud volcano. *Doklady Earth Sciences*, 422(1): 1181–1185.
 23. Zhigulev V.V., Gurinov M.G., Ershov V.V. **2008**. Deep structure of the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano: results of multidisciplinary seismic surveys. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2(4): 294–298.
 24. Vereshchagin V.N. (ed.) **1970**. [*Geology of the USSR*. Vol. 33. *Sakhalin Island. Geological description*]. Moscow: Nedra, 432 p.
 25. Verkhoturov A.A. **2022**. [Large detrital rocks in the Yuzhno-Sakhalinsk Mud Volcano deposits]. In: [*Geology on the edge of the continent: Materials of the II Youth Scientific Conference-School of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, September 12–16, 2022*]. Vladivostok: Far Eastern Federal University, p. 43–45.
 26. Poyarkova Z.N. (ed.) **1987**. [*Reference section of Cretaceous deposits of Sakhalin (Naibinsky Section)*]. Leningrad: Nauka, 196 p.
 27. Ershov V.V., Perstneva Yu.A. **2018**. [Lithochemical characterization of the mud breccia of the world’s mud volcanoes]. *Domestic Geology*, 4: 72–83. (In Russ.).
 28. Koulakov I., Serdyukov A.S., Kononov A.V., Mikhailov V.I., Safonov D.A., Duchkov A.A., Al-Arifi N., El Khrepy S. **2017**. Possible sources of hydrothermal activity and mud volcanism in southern Sakhalin inferred from local earthquake seismic tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(5): 1943–1958. <https://doi.org/10.1002/2017GC006820>
 29. Veselov O.V., Volgin P.F., Lyutaya L.M. **2012**. Structure of the sedimentary cover of the Pugachevo mud volcano area in Sakhalin: Evidence from geophysical modeling. *Russian Journal of Pacific Geology*, 6: 413–422.

Об авторе

Верхотуров Алексей Александрович (<https://orcid.org/0000-0002-3826-7339>), кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии и региональной геологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, ussr-91@mail.ru

Поступила 30.03.2024

Принята к публикации 28.04.2024

About the Author

Verkhoturov, Alexey A. (<https://orcid.org/0000-0002-3826-7339>), Cand. in Engineering, Senior Researcher, the Laboratory of geochemistry and regional geology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, ussr-91@mail.ru

Received 30 March 2024

Accepted 28 April 2024

© Авторы 2024 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2024. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.467

<https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.114-126>
<https://www.elibrary.ru/vjivyc>

Экспериментальная модель внутрисезонного хода ледовитости Охотского моря

И. В. Шумилов^{1,2}, И. Г. Минервин¹, В. М. Пищальник^{1,2}, В. А. Романюк¹

@E-mail: ilyarolevik1@yandex.ru

¹Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. В работе предложена экспериментальная модель прогноза внутрисезонной изменчивости площади ледяного покрова Охотского моря, реализованная в виде программы для ЭВМ. Физико-статистическая модель построена на основе следующих компонентов: взаимосвязь сезонного максимума площади ледяного покрова акватории Охотского моря с показателями приземной температуры воздуха и поверхности воды; взаимосвязь кратковременных колебаний ледовитости под воздействием циклонической деятельности в периоды наступления сизигий Луны; тренд многолетних изменений ряда ледовитости Охотского моря. Для построения прогностической физико-статистической модели проведен анализ различных рядов данных за период 1980–2018 гг. Основные источники данных для поиска взаимосвязей параметров – архивы реанализа ERA-Interim, ERA5, информация на основе наблюдений за температурой воздуха на прибрежных ГМС и пентадные карты распределения ледяного покрова по сплоченности, публикуемые Японским метеорологическим агентством. Алгоритмы прогностической модели реализованы на языке программирования Python с применением дополнительных программных библиотек. Модель позволяет производить вычисление прогнозных значений площади ледяного покрова в период его осенне-зимнего нарастания с ноября-декабря до наступления сезонного максимума (март) с заблаговременностью до 4 мес. В качестве входных данных для построения уравнений регрессии используются многолетние ряды значений температуры воздуха и поверхностного слоя воды, дат смены фаз Луны и значений площади ледяного покрова Охотского моря. Выходные данные модели – значения внутрисезонного хода ледовитости. Модель была проверена на периоде 2001–2020 гг., при этом средняя относительная ошибка вычисленных прогностических значений площади ледяного покрова по сравнению с фактическими была менее 7 %. Оправдываемость прогноза в период максимального развития и наступления сезонного максимума для умеренных и мягких зим по сложности ледовых условий составила 79 %.

Ключевые слова: Охотское море, ледяной покров, ледовитость моря, дистанционное зондирование Земли, моделирование, прогнозирование

Experimental model of intraseasonal variability of ice area in the Sea of Okhotsk

Ilya V. Shumilov^{1,2}, Igor G. Minervin¹, Vladimir M. Pishchalnik^{1,2}, Valery A. Romanyuk¹

@E-mail: ilyarolevik1@yandex.ru

¹Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. This paper proposes an experimental model for predicting the intraseasonal variability of ice area in the Sea of Okhotsk, implemented as a computer program. The physical and statistical model was built on the basis of the following components: the relationship of the seasonal maximum ice area in the Sea of Okhotsk with surface air and water surface temperature parameters; the relationship between short-term fluctuations in ice area influenced by cyclonic activity during lunar syzygies; and the tendency of long-term changes in ice area series in the Sea of Okhotsk. Various data series for the period 1980–2018 were analyzed in order to build a predictive physical and statistical model. The main data sources for determining parameter relationships were the ERA-Interim and ERA5 reanalysis archives, data on air temperatures from

coastal hydrometeorological stations, and five-day maps of the distribution of ice concentration published by the Japan Meteorological Agency. The predictive model algorithms were implemented in the Python programming language using additional software libraries. The model allows the calculation of predicted values of ice area during the period of its fall-winter growth from November/December until its seasonal maximum (March), with a lead time of up to four months. The input data for constructing regression equations were a long-term series of air and surface water temperature parameters, dates of lunar phase changes, and values of ice area in the Sea of Okhotsk. The output data of the model were the values of the intraseasonal variability of ice area. The model was tested for the period 2001–2020, and the average relative error of the calculated and predicted values of ice area compared to the actual values was less than 7%. The accuracy of prediction during the period of maximum development growth and the seasonal maximum for temperate and mild winters in terms of the complexity of ice conditions was 79 %.

Keywords: Sea of Okhotsk, ice area, sea ice, remote sensing, modeling, prediction

Для цитирования: Шумилов И.В., Минервин И.Г., Пищальник В.М., Романюк В.А. Экспериментальная модель внутрисезонного хода ледовитости Охотского моря *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 2, с. 114–126. <https://doi.org/10.30730/grtz.2024.8.2.114-126>; <https://www.elibrary.ru/vjivyc>

For citation: Shumilov I.V., Minervin I.G., Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A. Experimental model of intraseasonal variability of ice area in the Sea of Okhotsk. *Geosistemy perednykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 2, pp. 114–126. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/grtz.2024.8.2.114-126>; <https://www.elibrary.ru/vjivyc>

Финансирование и благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Сахалинского государственного университета «Создание научных основ управления процессами поглощения и накопления углерода биоморфолитосистемами прибрежно-морских водно-болотных угодий и прилегающих морских акваторий» (FEFF-2024-0004). Авторы благодарят уважаемых рецензентов за доброжелательную критику и конструктивные замечания, способствующие улучшению данной публикации.

Funding and Acknowledgements

The study was carried within the framework of the state assignment of Sakhalin State University “Creation of a scientific basis for managing the processes of carbon absorption and accumulation by biomorpholitic systems of coastal marine wetlands and adjacent marine areas” (FEFF-2024-0004).

The authors would like to thank the respected Reviewers for their kind criticism and constructive comments that contributed to the improvement of this publication.

Введение

В статье представлена экспериментальная прогностическая модель внутрисезонной ледовитости Охотского моря, необходимая для планирования работ, связанных с морской добычей биоресурсов, добычей нефти и газа на шельфовых проектах и обеспечением безопасности мореплавания. Сложные ледовые условия в холодный период года сильно затрудняют работу морского транспорта и проведение работ на шельфе, повышают риски возникновения аварийных ситуаций. Задачи по исследованию ледовых условий, оперативному мониторингу ледовой обстановки и прогнозированию внутрисезонной изменчивости ледяного покрова актуальны для снижения экономических рисков и обеспечения безопасности судоходства [1, 2, 3].

Исходные исторические сведения о ледяном покрове Охотского моря дают попутные судовые наблюдения в период 1929–1960 гг. [4], авиационные наблюдения 1957–1992 гг.

[2, 5] и спутниковый мониторинг, начавшийся с 1971 г. [6]. На основе данных наблюдений за ледовитостью были предприняты первые попытки формулировки закономерностей изменчивости ледяного покрова Охотского моря [7, 8], поиск прогностических связей между местоположением кромки льда и процессами атмосферной циркуляции [4, 9, 10], реализован физико-статистический метод прогноза ледовитости [11], апробирована гидродинамическая модель осенне-зимних процессов [12, 13], реализован прогноз вариаций площади ледяного покрова методом последовательных спектров [6]. В монографии В.В. Плотникова предложены и проанализированы результаты нескольких подходов к долгосрочному прогнозированию состояния ледяного покрова Охотского моря: подход с использованием коэффициентов Фурье для фонового прогноза декадной ледовитости Охотского моря, подход с применением метода группового учета аргументов, вероятностные подходы с применением метода апри-

орных условных вероятностей, модели цепей Маркова и байесовского прогноза [5].

Для решения задачи долгосрочного прогнозирования внутрисезонной изменчивости площади ледяного покрова Охотского моря нами разработана экспериментальная прогностическая физико-статистическая модель. Основными компонентами этой модели являются: взаимосвязь сезонного максимума площади ледяного покрова с показателями приземной температуры воздуха и поверхности воды; взаимосвязь кратковременных колебаний ледовитости под воздействием циклонической деятельности в периоды наступления фаз сизигий Луны; тренды многолетних изменений рядов ледовитости. Программная часть алгоритма модели была реализована на языке программирования Python (www.python.org) с применением дополнительных программных библиотек.

Материал и методы исследования

Для получения многолетних и внутрисезонных рядов площади ледяного покрова использовался архив карт-схем распределения ледяного покрова по сплоченности Японского метеорологического агентства (JMA) (www.data.jma.go.jp), который находится в открытом доступе. Карты-схемы JMA публикуются с 1971 г. по настоящее время и имеют пентадную дискретность. Анализировались сезонные наборы карт-схем JMA за периоды 1980–1997 гг. (с декабря по май) и 1998–2018 гг. (с ноября по июль). Обработка наборов карт-схем проводилась с помощью разработанного нами пакета модулей обработки ледовых данных «Ice Data Processing» [14].

В качестве исходных данных о температуре поверхностного слоя воды использовался архив реанализа ERA-Interim, содержащий данные за период 1979–2019 гг. в виде NetCDF-файлов (www.ecmwf.int). Выборка данных из NetCDF-файлов осуществлялась с помощью программного обеспечения Ocean Data View (odv.awi.de).

Были проанализированы ряды поверхностной температуры воды в нескольких точках акватории Охотского моря, равномерно распределенных по широте и принад-

лежащих трем его регионам – северо-западному, северо-восточному и южному [15, 16, 17] (рис. 1). Для поиска взаимосвязи между внутрисезонной площадью ледяного покрова и температурой воздуха были проанализированы данные наблюдений за температурой воздуха на прибрежных ГМС (в частности на ГМС Поронайск, Николаевск-на-Амуре, Александровск-Сахалинский, Магадан и Охотск) (tr5.ru) (рис. 1). Эти станции были выбраны по условиям широтного географического местоположения, позволяющего использовать их для анализа интенсивности поступления холода с материка на акваторию моря под действием зимнего муссона – одного из основных факторов, определяющих динамику развития ледяного покрова акватории Охотского моря [3, 18]. Для приведения к общему периоду при анализе рассматривались данные из указанных источников, охватывающие ледовые сезоны 1980–2018 гг.

Программные модули модели были реализованы с помощью языка программирования Python (www.python.org) с применением дополнительных программных библиотек

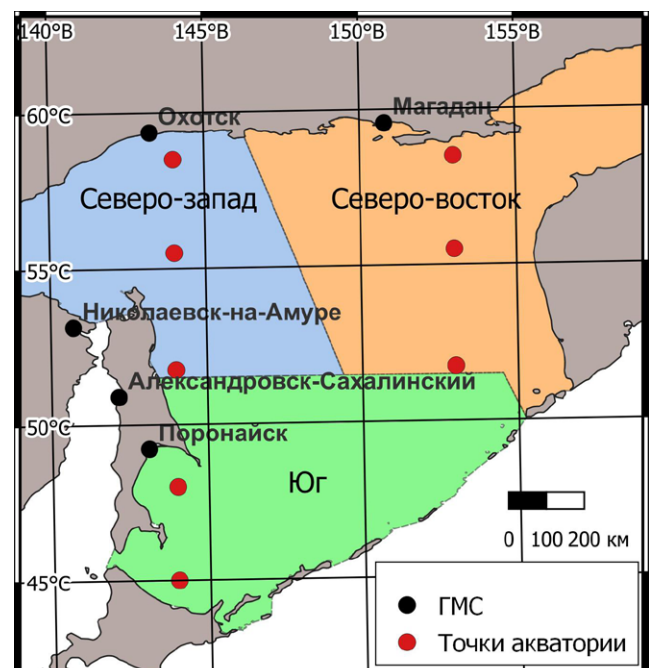


Рис. 1. Расположение ГМС и рассматриваемых точек акватории Охотского моря для анализа температуры воды и воздуха в его регионах – северо-западном, северо-восточном и южном.

Fig. 1. Location of hydrometeorological station and points in the Sea of Okhotsk considered for analysis of water and air temperatures in its three regions, northwest, northeast, and south.

NumPy (numpy.org) (для обработки числовых массивов), Pandas (pandas.pydata.org) (для обработки табличных данных и временных рядов), Scikit-learn (scikit-learn.org) (для реализации регрессионных функций), OpenPyXL (openpyxl.readthedocs.io) (для работы с табличными файлами формата .xlsx).

Результаты

Важной характеристикой для разработки прогностической модели внутрисезонной изменчивости площади ледяного покрова Охотского моря является сезонный максимум. Его значение зависит от интенсивности роста площади льда в осенне-зимний период, на которую, в свою очередь, влияют начальные гидрометеорологические условия в акватории – такие как температура воды и воздуха. При анализе были рассмотрены взаимосвязи температуры воды и воздуха на начальной стадии развития ледовитости с сезонным максимумом площади ледяного покрова в Охотском море в целом и в отдельных регионах. Для исследования применялась схема иерархического районирования на основе особенностей дрейфа и различия условий формирования ледяного покрова [15, 16, 17].

В ходе поиска необходимых предикторов для оценки сезонного максимума площади ледяного покрова была рассмотрена средняя температура поверхности воды в октябре (данные модели реанализа ERA-Interim) (www.ecmwf.int), отражающая начальные

температурные условия сезона (табл. 1). Проведенный анализ показал, что коэффициент корреляции между значением сезонного максимума площади ледяного покрова в Охотском море в целом и в его северо-восточном регионе и средней температурой поверхности воды в октябре в точке 51°45' N и 153°00' E (рис. 2) достигает значений –0.50 и –0.58 соответственно, что отвечает среднему уровню корреляции. Коэффициенты корреляции являются значимыми, так как превосходят по модулю критическое значение 0,22 корреляции Пирсона при уровне доверия 95 % (для 39-летнего ряда) [19].

Показатель средней температуры поверхности воды в октябре и значения сезонного максимума площади ледяного покрова Охотского моря находятся в противофазе, что показывает аппроксимация рядов с помощью полиномиальных трендов [19] (рис. 2). Наличие взаимосвязи со средним уровнем корреляции говорит о возможности применения предиктора предсезонной температуры воды для разработки прогностической модели площади ледяного покрова Охотского моря, в том числе для его северо-восточного региона.

В качестве второго предиктора для оценки сезонного максимума площади ледяного покрова рассмотрены показатели температуры воздуха на прибрежных ГМС. Для этого были выбраны ряды данных температур воздуха пяти ГМС, располагающихся в исследуемом регионе в пунктах: Александровск-Сахалин-

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между значениями сезонных максимумов площади ледяного покрова и средней температурой поверхности воды в октябре (1980–2018 гг.)

Table 1. Correlation coefficients between the values of seasonal maximum ice area and average water surface temperature in October (1980–2018)

Охотское море в целом	Северо-запад	Северо-восток	Юг	Координаты точек анализа данных температуры	
				N	E
–0.28	0.00	–0.22	–0.35	58°30'	144°00'
0.01	0.18	0.06	–0.14	55°30'	144°00'
–0.23	–0.01	–0.22	–0.27	51°45'	144°00'
–0.16	–0.02	–0.15	–0.19	58°30'	153°00'
–0.38	–0.25	–0.32	–0.42	55°30'	153°00'
–0.50	–0.24	–0.58	–0.38	51°45'	153°00'
–0.08	0.06	–0.05	–0.13	48°00'	144°00'
–0.13	0.04	–0.25	–0.01	45°00'	144°00'

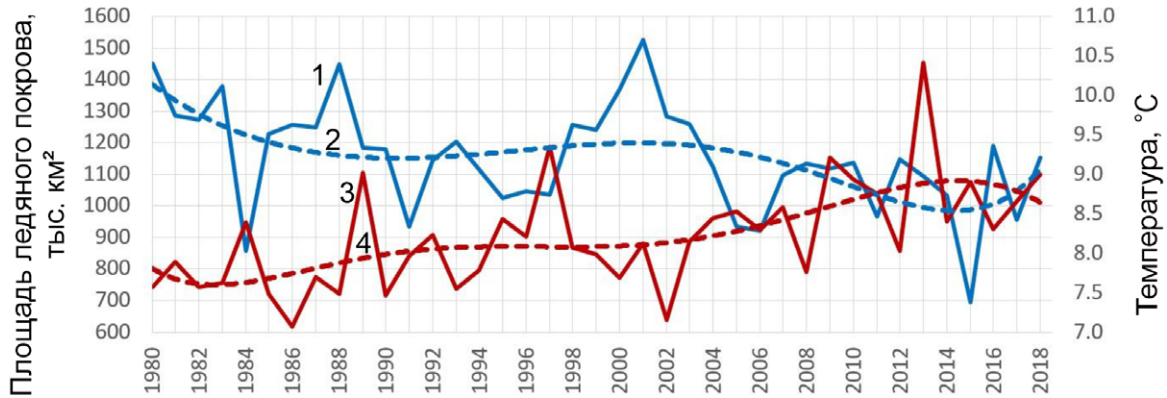


Рис. 2. Связь параметров сезонного максимума площади ледяного покрова Охотского моря и средней температуры поверхности воды в октябре (1980–2018 гг.). 1 – сезонный максимум площади ледяного покрова, 2 – полиномиальный ряд для сезонного максимума площади ледяного покрова, 3 – средняя температура поверхности воды в точке 51°45' N и 153°00' E в октябре, 4 – полиномиальный ряд для средней температуры поверхности воды в октябре.

Fig. 2. Relationship of the parameters of seasonal maximum ice area in the Sea of Okhotsk and average water surface temperature in October (1980–2018). 1 – seasonal maximum ice area, 2 – polynomial series for seasonal maximum ice area, 3 – average water surface temperature at the point 51°45' N and 153°00' E in October, 4 – polynomial series for average water surface temperature in October.

ский, Магадан, Николаевск-на-Амуре, Поронайск и Охотск (гp5.ru) (табл. 2). Показатели сумм градусо-дней мороза за сезон для данных ГМС хорошо коррелируют с показателем среднесезонной площади ледяного покрова Охотского моря, что подтверждает взаимосвязь процессов ледообразования с количеством накопленного за сезон холода [3]. Значения среднесезонной площади ледяного покрова вычислялись как среднее за период с 5 декабря по 31 мая. Для рассматриваемого периода 1980–2018 гг. коэффициенты корреляции составляют -0.75 для Александровск-Сахалинского, -0.72 для Магадана и Николаевска-на-Амуре, -0.80 для Поронайска (высокий уровень корреляции) и -0.69 для Охотска (средний уровень корреляции). Коэффициенты корреляции являются значимыми и превосходят соответствующее критическое значение

корреляции Пирсона $0,22$ при уровне доверия 95% (для 39-летнего ряда) [19].

Анализ показал, что наибольший коэффициент корреляции (-0.65) среднего значения температуры воздуха в ноябре с сезонным максимумом площади ледяного покрова Охотского моря соответствует ГМС Александровск-Сахалинский (табл. 2). Данные с ГМС Николаевск-на-Амуре и Поронайск также показывают высокие значения (-0.59 и -0.58 соответственно). Кроме того, большие значения с ГМС Александровск-Сахалинский получены для северо-восточного и южного регионов Охотского моря (табл. 2). Полученные коэффициенты соответствуют среднему уровню корреляции и являются значимыми, так как по модулю превосходят соответствующее критическое значение корреляции Пирсона $0,22$ при уровне доверия 95% (для 39-летнего ряда) [19].

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между значениями сезонных максимумов площади ледяного покрова и средней температурой воздуха по данным ГМС в ноябре (1980–2018 гг.)

Table 2. Correlation coefficients between the values of seasonal maximum ice area and average air temperature in November (1980–2018)

Александровск-Сахалинский	Магадан	Николаевск-на-Амуре	Поронайск	Охотск	Регион
-0.65	-0.29	-0.59	-0.58	-0.30	Охотское море
-0.40	-0.03	-0.34	-0.36	-0.06	Северо-запад
-0.64	-0.35	-0.65	-0.56	-0.34	Северо-восток
-0.54	-0.21	-0.42	-0.49	-0.22	Юг

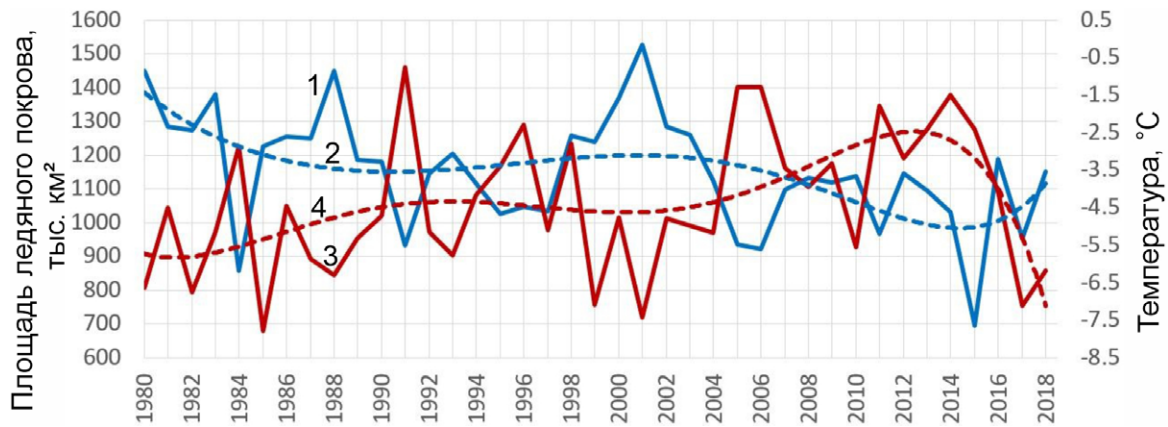


Рис. 3. Связь параметров сезонного максимума площади ледяного покрова Охотского моря и средней температуры воздуха в ноябре (1980–2018 гг.). 1 – сезонный максимум площади ледяного покрова, 2 – полиномиальный ряд для сезонного максимума площади ледяного покрова, 3 – средняя температура воздуха в ноябре (ГМС Александровск-Сахалинский), 4 – полиномиальный ряд для средней температуры воздуха в ноябре.

Fig. 3. Relationship of the parameters of seasonal maximum ice area in the Sea of Okhotsk and average air temperature in November (1980–2018). 1 – seasonal maximum ice area, 2 – polynomial series for seasonal maximum ice area, 3 – average air temperature in November (Aleksandrovsk-Sakhalinsky hydrometeorological station), 4 – polynomial series for average air temperature in November.

На рис. 3 приведено сравнение показателей сезонного максимума ледовитости Охотского моря и средней температуры воздуха в ноябре и их полиномиальных трендов. Наличие взаимосвязи параметра средней температуры воздуха в ноябре с сезонным максимумом площади ледяного покрова позволяет использовать этот предиктор при прогнозировании внутрисезонного хода ледовитости Охотского моря.

На ветровом и термическом режимах Охотского моря отражается воздействие циклонов, которые формируются в осенне-зимние сезоны в северо-западной части Тихого океана при взаимодействии двух центров действия атмосферы – алеутской депрессии и сибирского антициклона. При прохождении мощных циклонов через акваторию Охотского моря отмечается усиление южных ветров, которые способствуют ослаблению господствующего зимой северного переноса воздушных масс, что благоприятствует снижению ледовитости [22]. Внутрисезонные проявления циклонической деятельности в акватории Охотского моря и изменения направления ветра хорошо согласуются со сменами фаз Луны, обуславливающих формирование барических образований [21, 22].

Были проанализированы совпадения снижений площади ледяного покрова и наступления фаз сизигий в период 1980–2018 гг. При

учете наличия снижения площади ледяного покрова хотя бы в одном из регионов Охотского моря показатель количества совпадений составляет 60 %.

Циклоническое воздействие на ледяной покров проявляется не только в межгодовой, но и во внутрисезонной изменчивости [22]. Для выявления особенностей внутрисезонной изменчивости площади ледяного покрова в Охотском море были проанализированы пентадные данные колебаний значений данного показателя в осенне-зимний сезон за период 1980–2018 гг. (рис. 4). Как видно из диаграмм, в период с 10 по 25 декабря снижения площади ледяного покрова имеют самую низкую повторяемость (1–5 зафиксированных случаев на пентаду), а также небольшую среднюю величину (1–33 тыс. км²). В период с 31 декабря по 20 февраля наблюдается резкое повышение повторяемости (3–10 случаев) и увеличение среднего значения снижения площади льда (34–153 тыс. км²). В период с 25 февраля по 5 марта количество снижений площади ледяного покрова снова возрастает (10–16 случаев), а среднее значение снижений изменяется незначительно (43–63 тыс. км²) (рис. 4).

Внутрисезонный ход ледовитости Охотского моря в период ее осенне-зимнего нарастания хорошо описывается функцией распределения Ферми–Дирака (рис. 5) [23].

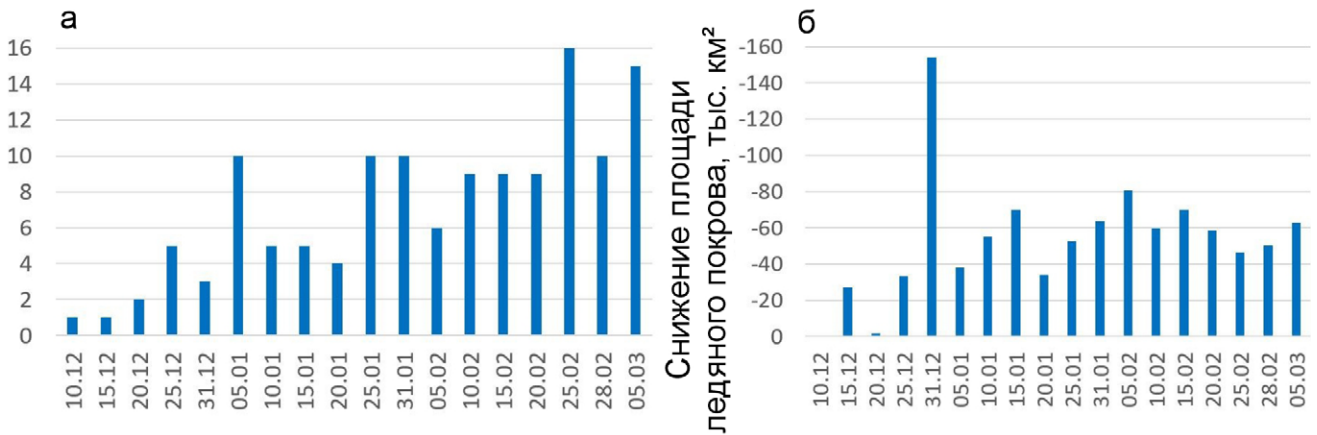


Рис. 4. Количество снижений (а) и среднее снижение (б) площади ледяного покрова Охотского моря в пентаду в период осенне-зимнего нарастания (1980–2018 гг.).

Fig. 4. The number of decreases (a) and average decrease (b) in ice area in the Sea of Okhotsk in the five-day period during the fall-winter growth (1980–2018).

На основе преобразованной функции распределения Ферми–Дирака и обнаруженных взаимосвязей было построено прогностическое уравнение внутрисезонной изменчивости площади ледяного покрова Охотского моря в период осенне-зимнего нарастания:

$$S(t) = \frac{S_R(T_a, T_w) + S_\beta(t) + \varepsilon}{e^{\frac{-t+b(t_m, S_m, t_a, S_a)}{c(t_m, S_m, t_a, S_a)} + 1}}, \quad (1)$$

где $S(t)$ – функция площади ледяного покрова на фазе ее осенне-зимнего нарастания от времени t ; $S_R(T_a, T_w)$ – функция регрессии сезонного максимума площади ледяного покрова от температуры воздуха T_a в ноябре и температуре воды T_w в октябре; $S_\beta(t)$ – функция снижения расчетного сезонного максимума площади ледяного покрова в результате воздействия циклонов в периоды сизигий Луны; ε – значение площади ледяного покрова на начало осенне-зимнего сезона (пентаду t_1); $b(t_m, S_m, t_a$ и $S_a)$ и $c(t_m, S_m, t_a$ и $S_a)$ – динамически изменяющиеся коэффициенты функции. Параметры S_a , t_m и S_m корректируются в течение хода сезона с учетом постепенного снижения расчетного значения сезонного максимума площади ледяного покрова на значение функции $S_\beta(t)$.

Анализ корреляционной связи сезонных максимумов площади ледяного покрова с данными температуры воздуха и поверхности воды (табл. 1, 2) показал, что наиболее информативными являются данные средней температуры воздуха в ноябре на ГМС Алек-

сандровск-Сахалинский и средней температуры воды в октябре в точке $51^\circ 45' N$ и $153^\circ 00' E$. Была произведена их нормализация (приведение к диапазону значений [1, 2]) и получено уравнение регрессии:

$$S_R(T_a, T_w) = \frac{S_R(T_a) + S_R(T_w)}{2} = \frac{k_1 T_a^{l_1} + k_2 T_w^{l_2}}{2}, \quad (2)$$

где $S_R(T_a, T_w)$ – функция регрессии максимума площади ледяного покрова по температуре воздуха и поверхности воды; $S_R(T_a)$ и $S_R(T_w)$ – функции регрессии по отдельным параметрам температуры воздуха и поверхности воды; T_a – приведенная к диапазону значений [1, 2] средняя температура воздуха в ноябре на ГМС Александровск-Сахалинский; k_1 , l_1 – коэффи-

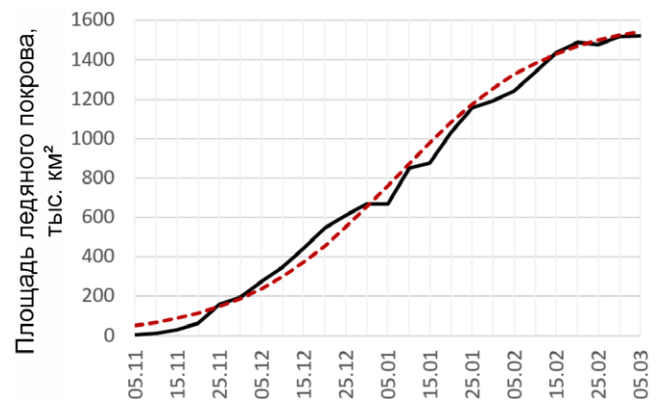


Рис. 5. Площадь ледяного покрова в Охотском море в сезон 2000–2001 гг. (сплошная линия) и функция распределения Ферми–Дирака (штриховая).

Fig. 5. Ice area in the Sea of Okhotsk in 2000–2001 (solid line) and the Fermi–Dirac distribution function (dashed line).

циенты парной степенной регрессии на основе температуры воздуха; T_w – приведенная к диапазону значений [1, 2] средняя температура поверхности воды в октябре в точке $51^{\circ}45' N$ и $153^{\circ}00' E$; k_2, l_2 – коэффициенты парной степенной регрессии на основе температуры поверхности воды.

На рис. 6 представлен фактический ряд сезонных максимумов ледовитости и ряд, полученный на основе функции регрессии $S_R(T_a, T_w)$. Коэффициент корреляции между фактическим и вычисленным с помощью функции регрессии рядами составил 0.74. Коэффициент является значимым с высоким уровнем корреляции, так как по модулю превосходит соответствующее критическое значение корреляции Пирсона 0,22 при уровне значимости 95 % (для 39-летнего ряда). Средняя относительная ошибка составила 8 %.

Для корректировки прогностической кривой в периоды наступления сизигий в уравнение прогноза площади ледяного покрова был введен дополнительный параметр – функция $S_{\beta}(t)$, отражающий снижение прогнозного максимума площади ледяного покрова с течением времени:

$$S_{\beta}(t) = H_{\beta} * \left(1 - \sum_{i=1}^t P(\beta_i) \right), \quad (3)$$

где $S_{\beta}(t)$ – функция снижения прогнозного мак-

симула площади ледяного покрова в результате циклонов, H_{β} – величина снижения площади ледяного покрова в прогнозируемый сезон, полученная на основе аппроксимации методом оконного сглаживания многолетнего ряда снижений площади ледяного покрова в период осенне-зимнего нарастания, $P(\beta_i)$ – функция вероятности снижения площади ледяного покрова β_i в пентаду i .

Для учета вероятности резких снижений площади ледяного покрова под влиянием циклонической деятельности в периоды сизигий Луны была получена функция $P(\beta_i)$ следующего вида:

$$P(\beta_i) = \frac{\beta_i \text{Syz}(i)}{\sum_{j=1}^{t_a} (\beta_j \text{Syz}(j))}, \quad (4)$$

где $P(\beta_i)$ – функция вероятности снижения площади льда в пентаду от среднего количественного снижения площади льда β_i в пентаду i , $\text{Syz}(i)$ и $\text{Syz}(j)$ – функция сизигий Луны, принимающая значение 1 в периоды новолуний и полнолуний и 0 в остальных случаях, t_a – пентада наступления сезонного максимума площади ледяного покрова. При составлении формул (3) и (4) использовались стандартные формулы теории вероятностей [19].

На основе описанных подходов и математических функций была разработана программа, включающая в себя программные модули



Рис. 6. Сопоставление (а) фактического ряда сезонных максимумов площади ледяного покрова Охотского моря и (б) ряда регрессии $S_R(T_a, T_w)$ на основе параметров средней температуры воздуха в октябре на ГМС Александровск-Сахалинский и средней температуры поверхности воды в октябре в точке $51^{\circ}45' N$ и $153^{\circ}00' E$ (1980–2018 гг.).

Fig. 6. Comparison (a) of the actual series of seasonal maximum ice area in the Sea of Okhotsk and (b) the regression series $S_R(T_a, T_w)$ based on the parameters of average air temperature in October at the Aleksandrovsk-Sakhalinsky hydrometeorological station and average water surface temperature in October at the point $51^{\circ}45' N$ and $153^{\circ}00' E$ (1980–2018).

экспериментальной модели внутрисезонной ледовитости, позволяющие вычислять прогнозные значения площади ледяного покрова Охотского моря в осенне-зимний сезон с заблаговременностью до 4 мес. Прогностическая программа состоит из отдельных взаимосвязанных программных модулей, блок-схема которых представлена на рис. 7. Главным компонентом, включающим алгоритмы обработки, является основной модуль модели. Запуск модулей обработки происходит через командный скрипт, написанный на языке командной оболочки ОС (batch script для ОС семейства Windows; bash для дистрибутивов ОС Linux). Командный скрипт производит запуск модулей обработки через встроенный интерпретатор Python. вспомогательные модули используются в режиме разработчика (для публикации новых версий проекта и других рабочих задач).

Пакет с классами и методами обработки данных включает в себя функционал для обработки данных в виде субпакетов, реализующих: работу с файловой системой и файлами расширений .xlsx, .csv, .xml; функции для анализа и обработки рядов данных (в том числе аппроксимации, экстраполяции, нормализации, регрессии, сглаживания); дополнительные утилиты для работы с данными разных типов. Файлы настроек представляют собой xml-файлы с настройками для инициализации модели. Дополнительные файлы настроек для осуществления расчетов на произвольно заданных периодах могут опционально добавляться пользователем.

В качестве входных данных модели используются файлы: многолетнего ряда средней

температуры воздуха в ноябре, многолетнего ряда средней температуры поверхности воды в октябре, ряды внутрисезонной площади ледяного покрова, значения внутрисезонной динамики фаз Луны (периоды наступления сизигий). Исходные файлы включают фактические данные для обучения модели, а также опционально могут содержать реальные данные прогнозируемых сезонов для вычисления ошибок прогноза. Структура исходных данных представляет собой таблицы .xlsx или .csv формата.

Прогностическая модель внутрисезонной изменчивости ледовитости была применена для ретроспективного прогнозирования площади ледяного покрова в период осенне-зимнего нарастания для ряда наблюдений 2001–2020 гг. На рис. 8 представлены примеры графиков прогностических кривых площади ледяного покрова, полученных с помощью разработанной модели, и их сравнение с фактической площадью ледяного покрова в соответствующие сезоны. Минимальный прогноз на дату рассчитывается путем вычитания из значения площади ледяного покрова для оптимального прогноза значения средней абсолютной ошибки (на рассматриваемую дату), максимальный – соответственно путем прибавления средней абсолютной ошибки (на рассматриваемую дату). Для получения прогноза были использованы данные начиная с 1980 г., т.е. для обучения модели при построении прогноза на сезон 2000–2001 гг. использовались данные за период 1980–2000 гг., для сезона 2001–2002 гг. – данные за период 1980–2001 гг. и т.д. по аналогии до сезона 2019–2020 гг. Для построения прогноза на сезоны 2018–2019, 2019–2020 гг. были привлечены данные темпе-

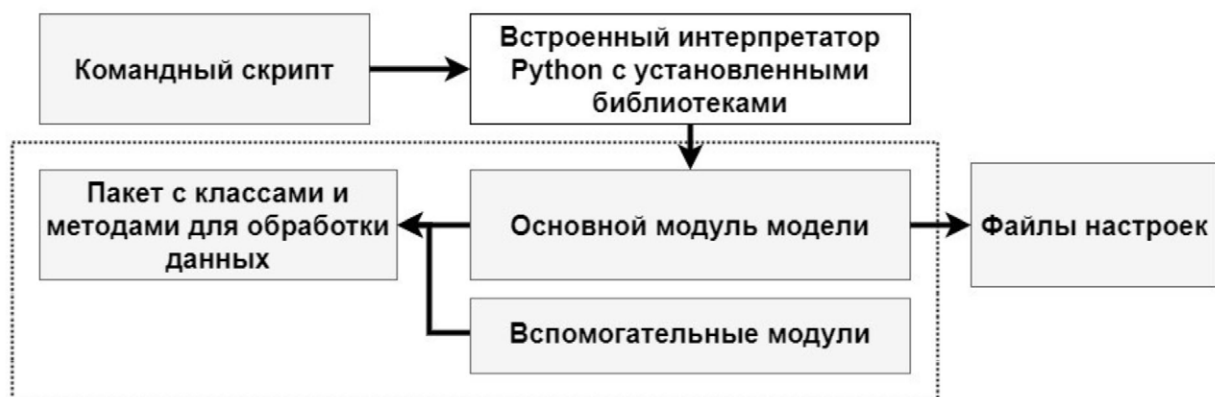


Рис. 7. Схема пакета программных модулей модели прогноза внутрисезонной изменчивости ледовитости Охотского моря.

Fig. 7. Diagram of the software package of the predictive model of intraseasonal variability of ice area in the Sea of Okhotsk.

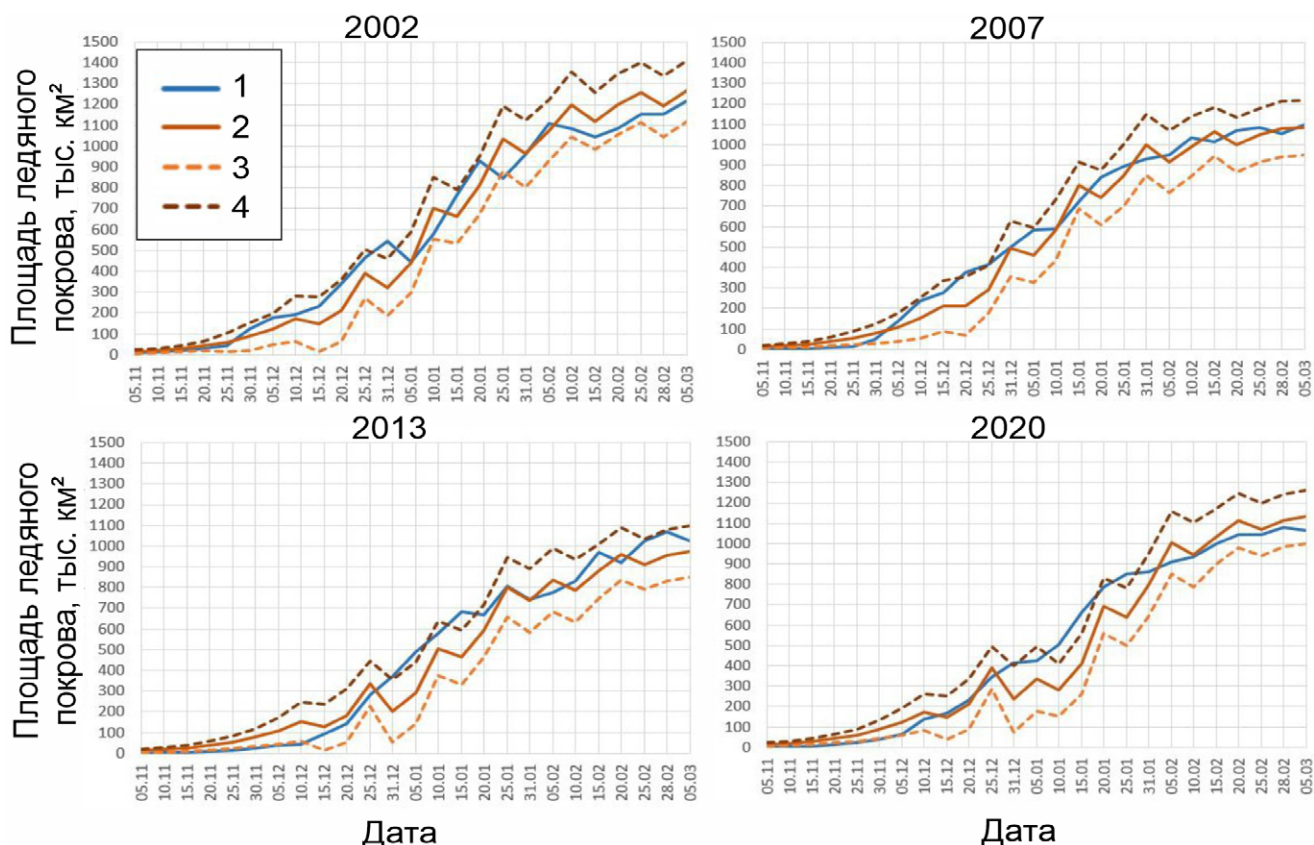


Рис. 8. Примеры прогноза и сравнение с фактической площадью ледяного покрова в соответствующие сезоны. 1 – фактическая площадь ледяного покрова, 2 – оптимальный прогноз, 3 – минимальный прогноз, 4 – максимальный прогноз.

Fig. 8. Examples of prediction and comparison with actual ice area in the corresponding seasons. 1 – actual ice area, 2 – optimal prediction, 3 – minimal prediction, 4 – maximal prediction.

ратуры воды, полученные с помощью модели ERA5, которая является идейным продолжением модели ERA-Interim (www.ecmwf.int).

Обсуждение

При анализе результатов установлено, что наибольшая точность прогноза площади ледяного покрова в период осенне-зимнего нарастания достигается при прогнозировании умеренных, а также мягких зим по сложности ледовых условий. Средняя относительная ошибка прогностических значений площади ледяного покрова по сравнению с фактическими при применении модели на периоде 2001–2020 гг. составила 6,6 %.

Прогнозная кривая имеет наибольшие отклонения от графика фактической площади ледяного покрова в суровые и экстремально мягкие зимы, когда в течение продолжительного времени устойчиво наблюдается большая или малая ледовитость моря. Большие отклонения значений связаны с особенностями

влияния природных факторов на скорость роста ледяного покрова в период осенне-зимнего нарастания. Под влиянием циклонической деятельности наблюдаются резкие уменьшения ледовитости, которые вызывается сплочением, сжатием, наслоением и торошением морских льдов.

Показатель оправдываемости прогноза на дату в период максимального развития и наступления сезонного максимума (15 февраля – 5 марта) для умеренных и мягких зим составил 79 %. Для периода осенне-зимнего нарастания с 25 ноября по 10 февраля оправдываемость варьирует от 43 до 71 %.

Заключение

С применением методов аппроксимации рядов, типизации зим по сложности ледовых условий, статистического и корреляционного анализа выявлены и проанализированы взаимосвязи площади ледяного покрова Охотского моря с гидрометеорологическими и астрономи-

ческими параметрами. На основе полученных результатов разработан физико-статистический метод долгосрочного прогноза ледовитости Охотского моря в осенне-зимний сезон с заблаговременностью до 4 мес., реализованный в виде экспериментальной программы. Разработанный метод в перспективе может применяться для осуществления прогноза ледовых условий на текущий сезон и его учета при построении безопасных судоходных маршрутов, а также при планировании работ на шельфе Охотского моря.

1. Выявлена взаимосвязь между средней температурой поверхности воды в точке 51°45' 153°00' E в октябре и площадью ледяного покрова Охотского моря в сезонный максимум со средним уровнем корреляции для всей акватории в целом (–0.50) и его северо-восточного региона (–0.58).

2. Выявлена взаимосвязь между приземной температурой воздуха на ГМС Александровск-Сахалинский и площадью ледяного покрова Охотского моря в сезонный максимум со средним уровнем корреляции (–0.65).

3. На основе взаимосвязи значения сезонного максимума площади ледяного покрова Охотского моря с показателями температуры воздуха и поверхности воды построена регрессионная функция со средней относительной ошибкой 8 %.

4. Обнаружена взаимосвязь резкого снижения площади ледяного покрова Охотского моря (до 9.5 % от общей площади акватории) и циклонической деятельности, обусловленной сменой фаз Луны.

5. Испытания метода долгосрочного прогноза площади ледяного покрова Охотского моря показали хорошие результаты по оправдываемости. Так, средняя относительная ошибка прогностических вычисленных значений за период 2001–2020 гг. составила 6.6 %. Оправдываемость прогноза на дату в период максимального развития ледовитости и наступления сезонного максимума (15 февраля – 5 марта) для умеренных и мягких зим составила 79 %.

Список литературы

1. *Атлас опасных и особо опасных для мореплавания и рыболовства гидрометеорологических явлений: Охотское, Японское и Берингово моря.* 1980. Л.: ГУНИО МО, 251 с.

2. Плотников В.В., Якунин Л.П., Петров А.Г. 1998. Ледовые условия и методы их прогнозирования. В кн.: *Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9: Охотское море*, вып. 1: *Гидрометеорологические условия*. СПб.: Гидрометеопиздат, с. 291–340.
3. Пищальник В.М., Романюк В.А., Минервин И.Г., Батухтина А.С. 2016. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. *Известия ТИНРО*, 185: 228–239. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-185-228-239>
4. Крындин А.Н. 1964. Сезонные и межгодовые изменения ледовитости и положения кромки льда на дальневосточных морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции. *Труды ГОИН*, 71: 5–80.
5. Плотников В.В. 2002. *Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз*. Владивосток: Дальнаука, 171 с.
6. Пищальник В.М., Иванов В.В., Трусков П.А. 2011. Прогноз вариаций площади ледяного покрова Охотского моря методом последовательных спектров. *Известия ТИНРО*, 165: 158–172. EDN: OEUVNR
7. Белинский Н.Н. 1965. *Морские гидрометеорологические прогнозы*. Л.: Гидрометеопиздат, 254 с.
8. Кудрявая К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И. 1974. *Морские гидрологические прогнозы*. Л.: Гидрометеопиздат, 310 с.
9. Крындин А.Н. 1966. Роль температурного поля океана в формировании аномалий атмосферной циркуляции и аномалий суровости зим на морях на примере северо-западной части Тихого океана. *Труды НИИЯК*, 36: 37–45.
10. Алдошина Е.И. 1964. О возможности предсказания положения кромки льда в Охотском море и Татарском проливе в весенние месяцы. *Труды ГОИН*, 76: 104–127.
11. Плотников В.В. 1982. Прогноз полей ледовых элементов в Охотском море физико-статистическим методом. *Труды ДВНИГМИ*, 96: 77–86.
12. Петров А.Г. 1984. Численное моделирование осенне-зимних гидрологических процессов на Охотском море. В кн.: *Тез. докл. Всесоюз. совещ. «Ледовые прогнозы и расчеты»*. Ленинград, с. 53–59.
13. Фролов И.Е., Петров А.Г. 1980. Численная модель осенне-зимних ледовых явлений. *Труды ДВНИГМИ*, 91: 3–12.
14. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023688937. *“Ice Data Processing”*. 2023. Авт.: Шумилов И.В., Романюк В.А., Пищальник В.М. № 2023682641 от 30.10.2023; опубл. 25.12.2023.
15. Pishchalnik V.M., Tambovsky V.S., Truskov P.A., Minervin I.G., Melkiy V.A., Romanyuk V.A., Galtsev A.A. 2013. Okhotsk Sea ice cover zoning. In: *Proceedings of the 28th International Symposium on*

- Okhotsk Sea & sea ice. 17–21 February, Mombetsu, Hokkaido, Japan*, p. 312–315.
16. Минервин И.Г., Романюк В.А., Пищальник В.М., Трусков П.А., Покрашенко С.А. **2015**. Районирование ледяного покрова Охотского и Японского морей. *Вестник РАН*, 85(1): 24–32.
 17. Романюк В.А. **2019**. *Ледовый режим Охотского моря в условиях глобальной тенденции увеличения температуры воздуха*: дис. ... канд. геогр. наук. ТОИ ДВО РАН, Владивосток, – 125 с.
 18. Fukamachi Y., Mizuta G., Ohshima K.I., Toyota T., Kimura N., Wakatsuchi M. **2006**. Sea ice thickness in the southwestern Sea of Okhotsk revealed by a moored ice-profiling sonar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C9). <https://doi.org/10.1029/2005jc003327>
 19. Андерсон Т. **1976**. *Статистический анализ временных рядов*. М.: Мир, 744 с.
 20. Глебова С.Ю. **2018**. Циклоны над Тихим океаном и дальневосточными морями в холодные и теплые сезоны и их влияние на ветровой и термический режим в последний двадцатилетний период. *Известия ТИНРО*, 193(2): 153–166. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-193-153-166>
 21. Тимофеев С.Д. **1968**. Влияние на атмосферу приливных сил Луны. *Труды ГГО*, 227: 62–70.
 22. Шумилов И.В., Минервин И.Г. **2021**. Разработка прогностического правила вариаций ледовитости на фазе начала ледообразования в Охотском море. В кн.: *Прогнозирование ледовой обстановки на дальневосточном участке продолжения Северного морского пути с применением ГИС-технологий в современный период потепления (г. Южно-Сахалинск, 29 ноября 2019 года)*: сб. докл. круглого стола. Сост. И.В. Никулина. Южно-Сахалинск: СахГУ, с. 49–56.
 23. Маргинсон Л.К., Смирнов Е.В. **2004**. *Квантовая физика*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 496 с. (Физика в техническом университете).
- References**
1. [*Atlas of dangerous and especially dangerous for navigation and fisheries hydrometeorological phenomena: the Sea of Okhotsk, the Sea of Japan and the Bering Sea*]. **1980**. Leningrad: GUNIO MO, 251 p. (In Russ.).
 2. Plotnikov V.V., Yakunin L.P., Petrov A.G. **1998**. [Ice conditions and methods of forecasting them]. In: [The Seas Project. *Marine hydrometeorology and hydrochemistry*. Vol. 9: *Sea of Okhotsk*, Iss. 1: *Hydrometeorological conditions*]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, p. 291–340. (In Russ.).
 3. Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A., Minervin I.G., Batukhtina A.S. **2016**. [Analysis of the dynamics of ice cover anomalies in the Sea of Okhotsk in the period from 1882 to 2015]. *Izvestia TINRO*, 185: 228–239. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-185-228-239>
 4. Kryndin A.N. **1964**. [Seasonal and interannual changes in ice cover and ice edge position in the Far Eastern seas due to the peculiarities of atmospheric circulation]. *Trudy GOIN*, 71: 5–80. (In Russ.).
 5. Plotnikov V.V. **2002**. [Variability of ice conditions in the Russian Far Eastern seas and their forecast]. Vladivostok: Dalnauka, 171 p. (In Russ.).
 6. Pishchalnik V.M., Ivanov V.V., Truskov P.A. **2011**. [Forecasting the ice cover variation in the Okhotsk Sea by the method of sequential spectra]. *Izvestia TINRO*, 165: 158–172. (In Russ.). EDN: OEUVNR
 7. Belinsky N.N. **1965**. [Marine hydrometeorological forecasts]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 254 p. (In Russ.).
 8. Kudryavaya K.I., Seryakov E.I., Skriptunova L.I. **1974**. [Marine hydrological forecasts]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 310 p. (In Russ.).
 9. Kryndin A.N. **1966**. [The role of the ocean temperature field in the formation of atmospheric circulation anomalies and anomalies of winter severity in the seas based on the northwestern part of the Pacific Ocean]. *Proceedings of NIIAK*, 36: 37–45. (In Russ.).
 10. Aldoshina E.I. **1964**. [On the possibility of predicting the ice edge position in the Sea of Okhotsk and the Tatar Strait in the spring months]. *Trudy GOIN*, 76: 104–127. (In Russ.).
 11. Plotnikov V.V. **1982**. [Forecast of ice element fields in the Sea of Okhotsk using a physical-statistical method]. *Trudy DVNIGMI*, 96: 77–86. (In Russ.).
 12. Petrov A.G. **1984**. [Numerical modeling of fall-winter hydrological processes in the Sea of Okhotsk]. In: *Abstracts of reports of the All-Union Council “Ice forecasts and calculations”*. Leningrad, p. 53–59. (In Russ.).
 13. Frolov I.E., Petrov A.G. **1980**. Numerical model of autumn-winter ice phenomena. *Trudy DVNIGMI*, 91: 3–12. (In Russ.).
 14. [Computer program registration certificate] No. 2023688937. “Ice Data Processing”. **2023**. Authors: Shumilov I.V., Romanyuk V.A., Pishchalnik V.M. No. 2023682641 from 30.10.2023; publ. 25.12.2023. (In Russ.).
 15. Pishchalnik V.M., Tambovsky V.S., Truskov P.A., Minervin I.G., Melkiy V.A., Romanyuk V.A., Galtsev A.A. **2013**. Okhotsk Sea ice cover zoning. In: *Proceedings of the 28th International Symposium on Okhotsk Sea & sea ice. 17–21 February, Mombetsu, Hokkaido, Japan*, p. 312–315.
 16. Minervin I.G., Romanyuk V.A., Pishchalnik V.M., Truskov P.A., Pokrashenko S.A. **2015**. Zoning the ice cover of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan. *Her-*

- ald of the Russian Academy of Sciences*, 85: 132–139. <https://doi.org/10.1134/s1019331615010049>
17. Romanyuk V.A. **2019**. [*Ice regime of the Sea of Okhotsk in the context of the global trend of increasing air temperature*]: Diss. of Cand. Sci. (Geography). TOI FEB RAS, Vladivostok, 125 p. (In Russ.).
 18. Fukamachi Y., Mizuta G., Ohshima K.I., Toyota T., Kimura N., Wakatsuchi M. **2006**. Sea ice thickness in the southwestern Sea of Okhotsk revealed by a moored ice-profiling sonar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C9). <https://doi.org/10.1029/2005jc003327>
 19. Anderson T. **1976**. [*The statistical analysis of time series*]. Moscow: Mir, 744 p. (In Russ.). From Engl.: Anderson T. **1971**. *The statistical analysis of time series*. John Wiley & Sons, Inc. (Wiley Series in Probability and Statistics).
 20. Glebova S.Yu. **2018**. Cyclones over the Pacific Ocean and Far Eastern seas in cold and warm seasons and their influence on wind and thermal regime in the last twenty-year period. *Izvestiya TINRO*, 193(2): 153–166. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-193-153-166>
 21. Timofeev S.D. **1968**. [The influence of lunar tidal forces on the atmosphere]. *Trudy GGO*, 227: 62–70. (In Russ.).
 22. Shumilov I.V., Minervin I.G. **2021**. [Development of a predictive rule for ice cover variations at the beginning of ice formation in the Sea of Okhotsk]. In: *Forecasting ice conditions in the Far Eastern section of the Northern Sea Route extension using GIS technologies in the modern warming period (Yuzhno-Sakhalinsk, November 29, 2019)*: collection of round table reports. Yuzhno-Sakhalinsk: SakhSU, p. 49–56. (In Russ.). Development of a predictive rule for ice cover variations during the beginning of ice formation in the Sea of Okhotsk
 23. Martinson L.K., Smirnov E.V. **2004**. *Quantum physics*. Moscow: Publ. House of N.E. Bauman MSTU, 496 p. (Physics at a technical university). (In Russ.).

Об авторах

Шумилов Илья Валерьевич (<https://orcid.org/0009-0003-6713-779X>), младший научный сотрудник, Сахалинский климатический центр Сахалинского государственного университета; младший научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, Южно-Сахалинск, Россия, ilyarolevik1@yandex.ru

Минервин Игорь Георгиевич (<https://orcid.org/0000-0002-5016-4199>), кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроэнергетики и физики Института естественных наук и техносферной безопасности, Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия, igor@minervin.ru

Пищальник Владимир Михайлович (<https://orcid.org/0000-0003-1432-6741>), доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории дистанционного зондирования Земли (ЮСНИС) СахГУ и РАН, Сахалинский государственный университет; ведущий научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, Южно-Сахалинск, Россия, vpishchalnik@rambler.ru

Романюк Валерий Анатольевич (<https://orcid.org/0000-0002-9993-7965>), кандидат географических наук, доцент кафедры геологии и нефтегазового дела Технического нефтегазового института, Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия, varomanyuk2020@gmail.com

About the Authors

Shumilov, Ilya V. (<https://orcid.org/0009-0003-6713-779X>), Junior Researcher, Sakhalin climate center of the Sakhalin State University; Junior Researcher of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, ilyarolevik1@yandex.ru

Minervin, Igor G. (<https://orcid.org/0000-0002-5016-4199>), Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor at the Department of electrical power engineering and physics, Institute of Natural Sciences and Technosphere Safety, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, igor@minervin.ru

Pishchalnik, Vladimir M. (<https://orcid.org/0000-0003-1432-6741>), Doctor of Engineering, Professor, Principal Researcher of the Scientific research laboratory for remote sensing of the Earth of Sakhalin State University and Russian Academy of Sciences, Sakhalin State University; Leading Researcher of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, vpishchalnik@rambler.ru

Romanyuk, Valery A. (<https://orcid.org/0000-0002-9993-7965>), Cand. of Sci. (Geography), Associate Professor at the Department of geology and oil and gas engineering, Technical Oil and Gas Institute, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, varomanyuk2020@gmail.com

Поступила 23.01.2024

Принята к публикации 20.05.2024

Received 23 January 2024

Accepted 20 May 2024

© Автор 2024 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author 2024. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.79+551.8+581.52

<https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.127-141>
<https://www.elibrary.ru/evlhaw>

Субфоссильные спорово-пыльцевые спектры горных территорий на примере полуострова Камчатка

Е. О. Мухаметшина

E-mail: eomukhametshina@gmail.com

Институт географии РАН, Москва, Россия

Резюме. В статье приведены результаты анализа состава 27 рецентных (поверхностных) спорово-пыльцевых проб, собранных в типичных растительных сообществах в северной части Центральной Камчатской депрессии и на обрамляющих ее склонах Срединного хребта и влк. Ключевская сопка. Наши данные показывают, что спорово-пыльцевые спектры в целом достоверно отражают состав лесных растительных сообществ, но степень участия пыльцы в спектрах некоторых древесных таксонов не всегда соответствует их роли в фитоценозах. Адекватность спектров растительным сообществам подтверждается кластерным анализом, согласно которому наиболее статистически похожие спорово-пыльцевые спектры формируются в схожих фитоценозах. На соотношение основных таксонов в спектрах всех фитоценозов, но особенно в верхних высотных поясах, значительное влияние оказывают региональные компоненты. Установлено, что участие пыльцы хвойных пород деревьев в спектрах занижено по сравнению с их реальным участием в растительных сообществах. Эти особенности необходимо учитывать при интерпретации ископаемых спорово-пыльцевых спектров. Наши материалы позволили выделить таксоны, пыльца которых часто встречается в спектрах субальпийского и альпийского высотных поясов: кустарниковая ольха, лилейные, гречишные, астровые, а также сосюра и крохоблекка. Наиболее сильное влияние локальной растительности прослеживается в спектрах болот и прибрежных фитоценозов. Для них типично присутствие пыльцы ольхи, ивы, тополя, а также розоцветных, осоковых, сабельника, восковника, вахты и спор полиподиевых папоротников и хвощей. Наши материалы позволяют проводить более обоснованные реконструкции растительности Камчатки на основе спорово-пыльцевого анализа при исследовании ископаемых пыльцевых спектров, а также могут быть использованы при интерпретации пыльцевых данных других горных территорий.

Ключевые слова: субфоссильные палиноспектры, спорово-пыльцевой анализ, Камчатка, Центральная Камчатская депрессия

Subfossil spore-pollen spectra of mountainous areas: the case of the Kamchatka Peninsula

Ekaterina O. Mukhametshina

E-mail: eomukhametshina@gmail.com

Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

Abstract. The article presents the results of the composition analysis of 27 recent (surface) pollen assemblages collected in typical plant communities in the northern part of the Central Kamchatka Depression and on the surrounding slopes of the Sredinny Range and Klyuchevskaya Sopka volcano. Our data show that spore-pollen spectra reliably represent the composition of forest plant communities. However, the proportions of pollen in the spectra of some arboreal taxa does not always correspond to their role in plant communities. The adequacy of the spectra for plant communities is confirmed by cluster analysis, according to which the most statistically similar spore-pollen spectra are formed in similar plant communities. Regional components of the spectra in surface samples distort the ratios of main taxa in plant communities, especially in the high altitudinal vegetation belt. The participation of coniferous tree pollen in the spectra is underestimated compared to their actual presence in plant communities. These features must be considered when interpreting fossil spore-pollen spectra. Our materials made it possible to identify taxa whose pollen is often found in the spectra of the subalpine and alpine zones: *Alnus alnobetula*, Liliaceae, Polygonaceae, Asteraceae, *Saussurea* and *Sanguisorba*. The strongest in-

fluence of local vegetation is observed in the spectra of swamps and coastal plant communities. The spectra of these communities usually contain pollen of *Alnus hirsuta*, *Salix*, and *Populus*, as well as Rosaceae, Cyperaceae, Comarum, *Myrica*, and *Menyanthes*, and spores of Polypodiaceae and *Equisetum*. Our materials will facilitate more reasonable reconstructions of Kamchatka vegetation based on the pollen analysis in the study of fossil pollen spectra of the Kamchatka Peninsula, as well as in the interpretation of pollen data from other mountainous regions.

Keywords: subfossil spore-pollen spectra, pollen analysis, Kamchatka, Central Kamchatka Depression

Для цитирования: Мухаметшина Е.О. Субфосильные спорово-пыльцевые спектры горных территорий на примере полуострова Камчатка. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 2, с.127–141. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.2.127-141>; <https://www.elibrary.ru/evlhaw>

For citation: Mukhametshina E.O. Subfossil spore-pollen spectra of mountainous areas: the case of the Kamchatka Peninsula. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 2, pp. 127–141. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.2.127-141>; <https://www.elibrary.ru/evlhaw>

Финансирование и благодарности

Полевые работы выполнены при поддержке мегагранта «Палеоэкологические реконструкции как ключ к пониманию прошлых, текущих и будущих изменений климата и окружающей среды в России» (соглашение № 075-15-2021-599 от 08.06.2021), а палинологические исследования – в рамках темы государственного задания Института географии РАН (FMWS-2024-0005).

Автор выражает искреннюю благодарность А.Л. Захарову и Д.Д. Воронцову за помощь при сборе полевых материалов, а также О.К. Борисовой за ценные замечания и помощь на всех этапах работы. Автор искренне признателен Елене Юрьевне Новенко за внимание к данной работе, ценные конструктивные замечания и рекомендации.

Funding and Acknowledgements

Field work was carried out with the support of the Megagrant “Palaeoecological reconstructions as the key to understanding past, current, and future climate and environmental changes in Russia” (agreement no. 075-15-2021-599, August 6, 2021). Palynological studies were carried out within the framework of the state assignment to the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (FMWS-2024-0005).

The author expresses her sincere gratitude to A.L. Zakharov and D.D. Vorontsov for their assistance in collecting field data, as well as to O.K. Borisova for her valuable comments and guidance at all stages of work. The author is sincerely grateful to Elena Yu. Novenko for her attention to this paper, valuable constructive comments, and recommendations.

Введение

Реконструкция растительности горных районов сопряжена с трудностями интерпретации палинологических данных, поскольку верхняя граница леса чутко реагирует на изменения климата, и это отражается на формировании пыльцевых спектров. Из-за особенностей аккумуляции осадков на склонах и в понижениях рельефа, реакции растительности на изменения климата, разнообразия ландшафтов на ограниченной территории и наличия высотной поясности формируются своеобразные спорово-пыльцевые комплексы, которые могут существенно различаться, несмотря на географическую близость. Поэтому важно рассмотреть соответствие современных спорово-пыльцевых спектров (далее – СПС) локальной и зональной растительности.

Как известно, помимо общих закономерностей, влияющих на формирование СПС, в каждом районе есть своя специфика накопле-

ния пыльцы и спор в осадках. Именно поэтому до сих пор практически любое палинологическое исследование в новом регионе начинается с изучения состава рецентных проб из разных растительных сообществ. Исследования такого рода, особенно на территориях с горным рельефом, к которым относится п-ов Камчатка, необходимы для корректной интерпретации ископаемых СПС.

В литературе представлен анализ современных СПС для ряда территорий Камчатки: для Центральной Камчатской депрессии (далее – ЦКД) [1], северной [2] и западной [3] Камчатки. Тем не менее, до сих пор изучение поверхностных СПС на Камчатке проходило только в рамках палеогеографических исследований, но специальной работы по рецентным пробам не проводилось. Задачей нашего исследования стало изучение состава спорово-пыльцевых спектров типичных растительных сообществ в днище ЦКД и основных высот-

ных поясов на прилегающих горных склонах для сравнения рецентных СПС с составом растительности в местах отбора. Это позволит оценить вклад локальных, региональных и экстразональных компонентов в формирование рецентных СПС.

Характеристика района исследования

Изолированность от материковой части Евразии и гористый рельеф являются определяющими ландшафтообразующими характеристиками Камчатского п-ова. Активная тектоника и вулканизм способствовали формированию Срединного и Восточно-Камчатского хребтов, между которыми простирается ЦКД. Полуостров омывается холодными водами Охотского моря с запада и Тихого океана с востока. В результате на нем сформировался океанический избыточно-влажный климат с прохладным влажным летом и холодной снежной зимой. Осадки в ЦКД, обильные в течение всего года, преобладают над испарением (коэффициент увлажнения 1.0–1.3)*. ЦКД характеризуется более континентальным климатом по сравнению с остальной частью полуострова: зимой здесь наблюдаются самые низкие температуры, а лето теплее, чем на побережье*, что создает более благоприятные условия для развития лесной растительности. Рельеф северной части ЦКД осложняется вулканическими постройками Ключевской группы вулканов и влк. Шивелуч. Активность этих систем оказывает разностороннее влияние на растительность прилегающих территорий, как ингибируя развитие некоторых растений, так и способствуя росту других [4].

Центральная Камчатская депрессия относится к Тихоокеанской лугово-лесной ботанико-географической провинции [5]. Распределение лесных формаций определяется как широтной зональностью, так и высотной поясностью. В днище северной части ЦКД нижний пояс растительности образован лиственничными и березово-лиственничными

лесами из лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) [6]. Менее распространена ель аянская (*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carrière), которая формирует самостоятельные хвойные и березово-хвойные леса в центральной части ЦКД и на склонах вулканов Шивелуч (рис. 1b) и Харчинский. На горных склонах, обрамляющих ЦКД, до высоты 600–800 м преобладают каменноберезняки (*Betula ermanii* Cham.) (рис. 1d). Выше лесной пояс растительности сменяется субальпийским. В нем представлены фитоценозы с доминированием кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) на склонах Срединного хребта и кустарниковой ольхи (*Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* (Rupr.) Raus, далее упоминается как *Alnus alnobetula*) на склонах влк. Ключевская сопка (рис. 1a) и Восточно-Камчатского хребта. В альпийском поясе преобладают тундровые фитоценозы, включая луговинные тундры (рис. 1 c, f), лишайниковые и моховые сообщества, кустарничковые и каменистые тундры [6]. Высокие горные вершины лишены растительности, а прибрежные области рек и озер часто покрыты пойменными лесами из тополя душистого (*Populus suaveolens* Fisch.), чозении толокнянколистной (*Chosenia arbutifolia* (Pall.) A.K.Skvortsov) и ольхи волосистой (*Alnus hirsuta* (Spach) Rupr., далее – ольха) [6].

Материалы и методы

Сопоставление СПС с локальной и региональной растительностью выполнено на основе анализа 27 проб (рис. 1) современных почв и русловых наилок из различных растительных сообществ (табл. 1). Для этого пробы отбирали из разных типичных лесных сообществ в долинах и предгорьях, а также из субальпийского и альпийского поясов и выше границы распространения растительности. Отбор образцов для пыльцевого анализа проводился в ходе полевого сезона 2021 г. с 21 июля по 8 августа. Вблизи водных объектов отбирался прирусловой наилок, а в других местах – верхний 1 см почвы с учетом разнообразия фито-

* Атлас СССР. 1983. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР.
Atlas USSR. 1983. Moscow: Glavnoe upravlenie Geodezii i Kartografii pri Sovete Ministrov SSSR. (In Russ.)

ценозов, чтобы охватить наиболее типичные растительные сообщества. В точках отбора описывался флористический состав каждого яруса растительности с указанием обилия основных таксонов, высоты и диаметра стволов деревьев, сомкнутости крон, площади проективного покрытия травянистых растений [6]. Краткое описание формаций приведено по [6] (табл. 1).

Поверхностные пробы обрабатывались на базе лаборатории палеоархивов природной среды Института географии РАН. Для экстракции пыльцы и спор применялась модифицированная методика В.П. Гричука [7]. Модификация методики заключается в замене в качестве тяжелой жидкости раствора калия-кадмия йодистого на ГПС-В, разводимую до той же плотности (2.25 г/см³). Ацетализ был прове-

ден с использованием пропионового ангидрида [8]. Анализ проводился на световом микроскопе Motic BA-310 с увеличением в 400 раз. Для каждого образца подсчитывалось 300–500 зерен пыльцы и спор.

При определении использовались атласы-определители пыльцы и спор [9–13], а также коллекция пыльцевых образцов Института географии РАН. Пыльца рода *Betula* была разделена на три основных морфологических типа, которые на основании вышеупомянутых материалов соотнесены с одним из трех источников: *Betula ermanii* Cham., *B. verrucosa* Ehrh. (*B. sect. Albae*) и *B. exilis* Sukaczev (*B. sect. Nanae*). Так же происходило разделение *Alnus hirsuta* и *Alnus alnobetula*. Построение спорово-пыльцевой диаграммы проводили в программе Tilia GRAPH [14]. Содержание пыль-

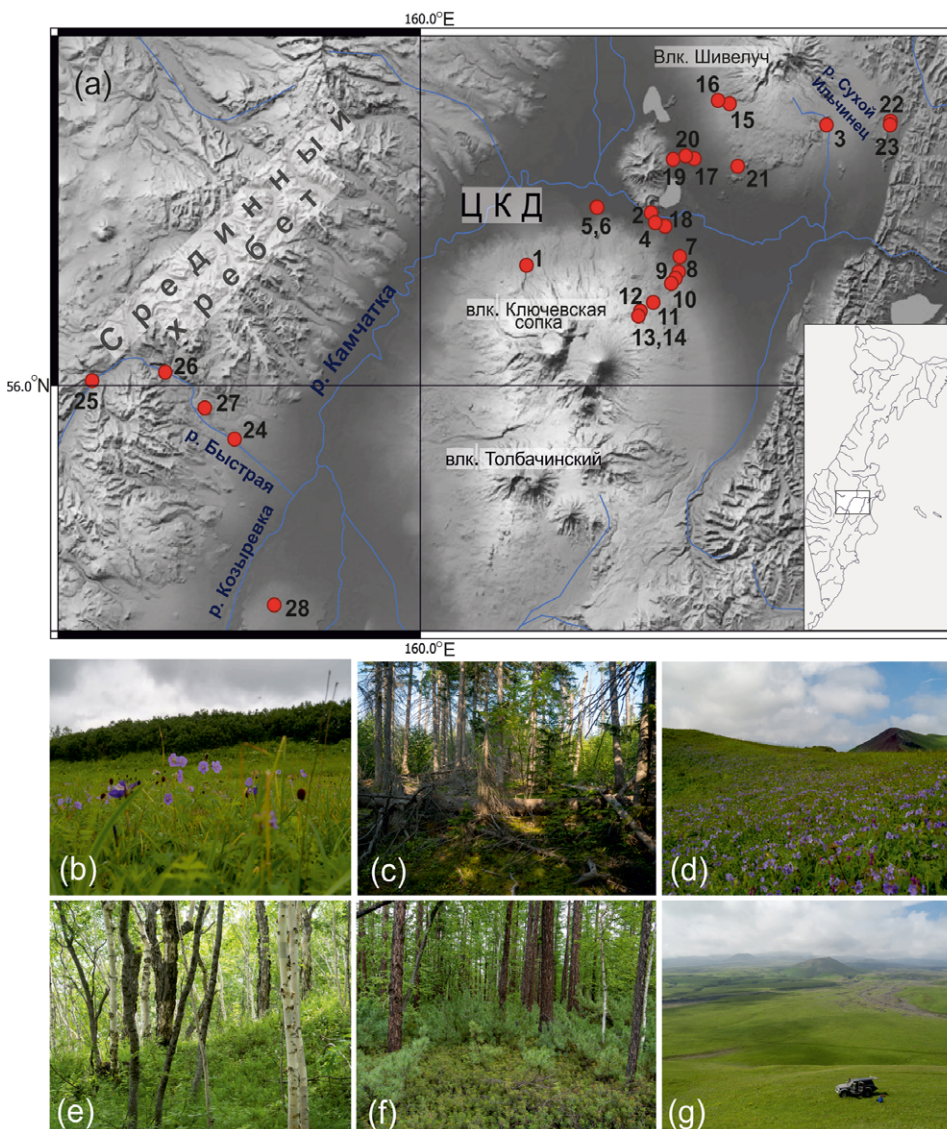


Рис. 1. (а) Район исследования (север Центральной Камчатской депрессии) и точки отбора проб для изучения субфоссильных спорово-пыльцевых спектров. В качестве подложки использована модель SRTM. На нижней панели фото характерных ландшафтов в точках отбора проб: (b) луговая растительность и заросли ольшеники на границе альпийского и субальпийского поясов (11); (c) еловый лес (16); (d) луговая растительность альпийского пояса (12); (e) каменистый берег (8); (f) лиственничный лес с зарослями кедрового стланика в подлеске (24); (g) тундровая растительность альпийского пояса (13).

Фото Д.Д. Воронцова.

Fig. 1. (a) Study area (north of the Central Kamchatka Depression) and sampling plots for subfossil pollen assemblages. The SRTM model was used as background. On the lower panel are photos of characteristic landscapes at sampling points: (b) meadow vegetation and alder thickets at the border of alpine and subalpine zones (11); (c) spruce forest (16); (d) meadow vegetation of the alpine zone (12); (e) Erman's birch forest (8); (f) larch forest with dwarf Siberian pine thickets in the undergrowth (24); (g) tundra vegetation of the alpine zone (13). Photo by D.D. Vorontsov.

цы и спор различных таксонов для групп AP (Arboreal pollen – пыльца деревьев и кустарников) и NAP (Non-arboreal pollen – пыльца трав и кустарничков) рассчитывалось в процентах от суммарного количества пыльцевых зерен наземных растений (AP + NAP = 100 %), а для спор подсчет содержаний проводился от общей суммы (суммарное количество всей пыльцы и спор в образце). Кластерный анализ CONISS выполнялся в программе Tilia GRAPH [14] методом суммы квадратов.

Результаты исследования

Все пробы были разделены на 8 групп, которые соответствуют растительным сообществам в точках отбора (рис. 2): хвойные леса (лиственничники и ельники), каменноберезняки, пойменные тополевики, ольшаники и ивняки, а также образцы, принадлежащие высокогорным формациям (субальпийскому, альпийскому и гольцовому поясу растительности) и болотам и сырým лугам.

Первые 3 выделенные группы спектров, соответствующие *лиственничникам, ельникам и каменноберезнякам*, характеризуются сходным составом СПС. В образцах этих групп резко преобладает пыльца деревьев и кустарников, доля которой составляет от 70 до 97 %. Преобладающим древесным таксоном в СПС этих проб является каменная береза (рис. 2). Доля ее пыльцы наибольшая в каменноберезняках (в среднем 40–82 %), а наименьшая в ельниках (19–52 %). В лиственничниках на долю пыльцы *Larix* приходится 1–5 %. В еловых лесах доля пыльцы *Picea* заметно больше, чем в СПС других образцов лесного пояса, – 4–28 %. В точках, где хвойные породы играют заметную, но не главную роль в составе древостоя, их доля также повышена и достигает 3–4 % для ели (пробы 28, 4) и 2–5 % для лиственницы (пробы 16, 4).

Практически во всех пробах первых трех групп присутствует в небольших количествах пыльца ольхи волосистой и кустарниковой – в среднем 9 и 4 % соответственно. В обр. 3, отобранном в лиственничном лесу с примесью ивы (*Salix*) и ольхи, на долю последней приходится 27 % (рис. 2). Пыльца кедрового стланика

присутствует во всех пробах в небольшом количестве, но в обр. 24 и 26 (из мест, где он формирует подлесок) его доля достигает 10–12 %.

Среди пыльцы трав в пробах из хвойных лесов преобладает пыльца злаков (Poaceae), на долю которых приходится 0.3–2 %. Обращает на себя внимание несоответствие значительной роли линеи северной (*Linnea borealis* L.) в травянистом ярусе еловых лесов при полном отсутствии ее пыльцы в СПС. На пыльцу вересковых (Ericaceae) приходится до 4–6 % в пробах 24 и 28, где довольно обилён багульник (*Ledum palustre* L.), однако в образцах 26, 15, также отобранных на участках, где в наземном покрове росли брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), голубика (*V. uliginosum* L.), багульник и др., пыльцы Ericaceae было заметно меньше. В СПС ельников относительно много пыльцы астровых (Asteraceae), а в лиственничниках – лютиковых (Ranunculaceae), отражающих луговое разнотравье (табл. 1).

В каменноберезняках несколько выше доля как злаков (до 8 %), так и осоковых (Cyperaceae) – до 6 %. Палинофлора группы трав и кустарничков каменноберезняков отличается более высоким таксономическим разнообразием и большей представленностью разнообразных луговых таксонов: лютиковые, астровые, зонтичные (Apiaceae), яснотковые (Lamiaceae), колокольчик (*Campanula*), крапива (*Urtica*) и другие. В лиственничниках и каменноберезняках единично встречаются зерна пыльцы клематиса (*Clematis*), который широко распространен на Камчатке. Доля спор также относительно более высокая в каменноберезняках по сравнению с хвойными лесами. Наиболее многочисленны плауны (*Lycopodium*) и полиподиевые папоротники (Polypodiaceae).

Следующую крупную группу составили спектры проб из прибрежных и пойменных (рис. 2) местообитаний: тополевиков, ольшаников, ивняков. Причем в точках 18 и 2, в отличие от всех других, был отобран прирусловой наилок. В пойменных лесах преобладает AP (63–96 %), на NAP приходится до 25 %, а на споры – до 17 %. Во всех образцах группы относительно ниже, но тем не менее значительно содержание пыльцы

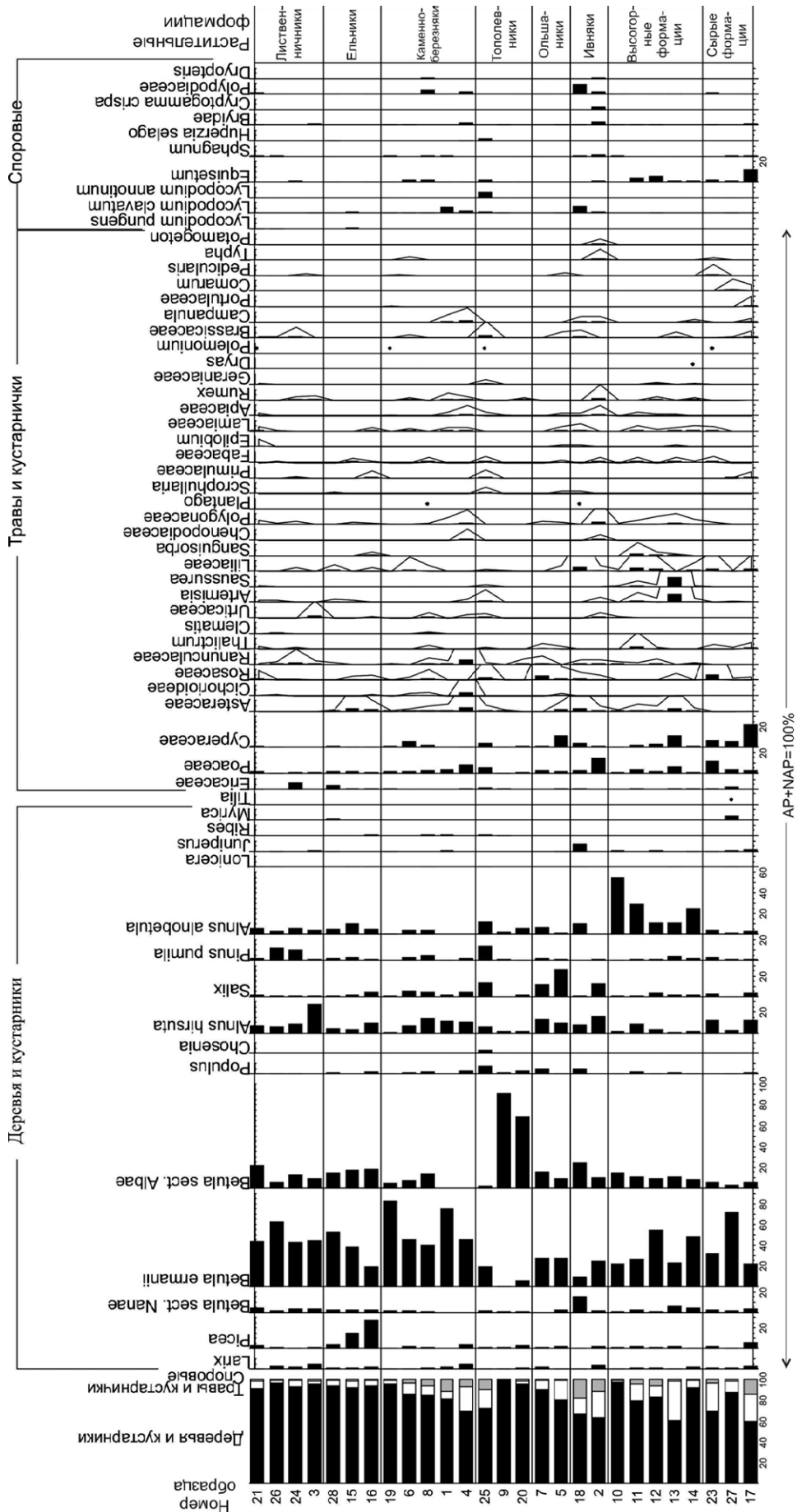


Рис. 2. Диаграмма спорово-пыльцевых спектров поверхностных проб в Центральной Камчатской депрессии и ее горном обрамлении. Преувеличивающие кривые проведены с увеличением в 10 раз. Растительные сообщества в точках отбора поверхностных проб приведены в табл.1. Проба № 22 не изучалась.
Fig. 2. Diagram of subfossil pollen assemblages in the Central Kamchatka Depression and its mountainous frame. In grey and white are the groups obtained with statistical proximity analysis of pollen assemblages. Plant communities at surface sampling points are given in Table 1. Sample No. 22 was not studied.

Таблица 1. Характеристика мест отбора поверхностных образцов на спорово-пыльцевой анализ

Table 1. Characteristics of the plant assemblages at the sampling points

Растительные формации	№ точки отбора	Абс. высота точки отбора, м	Растительные формации в месте отбора пробы	Сомкнутость крон (СК); площадь проективного покрытия ТКЯ (S _{пп})	Высотный пояс
Лиственничники	21	78	Лиственничник кустарниково-разнотравный с елью аянской и березами каменной и плосколистной, с подлеском из кедрового стланика, рябины, шиповника, жимолости. Травянисто-кустарничковый ярус (ТКЯ) представлен злаками, луговым разнотравьем и таежным низкотравьем	СК: 0.5; S _{пп} : 60	Лесной
	26	304	Лиственничник кустарниково-разнотравный с березой белой, ольхой, осиной и ивой с подлеском из кедрового стланика, рябины, жимолости; с влаголюбивыми видами (багульников, водяникой), брусничкой и таежным низкотравьем в ТКЯ	СК: 0.7; S _{пп} : 60	Лесной
	24	161	Лиственничник багульниково-кедровостланиковый с каменной березой, ольхой, можжевельником; в ТКЯ таежное низкотравье и луговое разнотравье	СК: 0.4; S _{пп} : 80	Лесной
	3	258	Лиственничник зеленомошный с ольхой и ивой в подлеске; ТКЯ представлен таежным низкотравьем	СК: 0.7; S _{пп} : 40	Лесной
Ельники	28	137	Ельник хвощовый сырой с березами каменной и белой, лиственницей, с подлеском из можжевельника, шиповника, кедрового стланика; в ТКЯ хвощи, таежное низкотравье и влаголюбивые виды (багульник, голубика)	СК: 0.5; S _{пп} : 50	Лесной
	15	331	Ельник низкотравный с березой и лиственницей и с подлеском из кедрового стланика, смородины; в ТКЯ таежное низкотравье и луговое разнотравье с водяникой и брусничкой	СК: 0.5; S _{пп} : 60	Лесной
	16	228	Ельник зеленомошный с лиственницей и березой, с рябиной ивой в подлеске; в ТКЯ таежное низкотравье	СК: 0.6; S _{пп} : 60	Лесной
Каменноберезняки	19	24	Каменноберезняк кустарниково-разнотравный с лиственницей, с рябиной, шиповником, жимолостью, ивой и ольхой в подлеске; с высокотравьем, луговым разнотравьем и таежным низкотравьем в ТКЯ	СК: 0.4; S _{пп} : 80	Лесной
	6	27	Каменноберезняк высокотравный с рябиной, боярышником, шиповником и жимолостью в подлеске; с крупнотравьем, высокотравьем, злаками и луговым разнотравьем в ТКЯ	СК: 0.6; S _{пп} : 80	Лесной
	8	139	Каменноберезняк разнотравный с ольхой, рябиной, жимолостью и смородиной в подлеске. ТКЯ представлен видами лугового и мезофильного разнотравья и таежным низкотравьем	СК: 0.6; S _{пп} : 80	Лесной
	1	500	Каменноберезняк разнотравный с подлеском из рябины, шиповника; с луговым и мезофильным разнотравьем и злаками в ТКЯ	СК: 0.7; S _{пп} : 80	Лесной
	4	44	Каменноберезняк разнотравный с елью и лиственницей, с подлеском из рябины, шиповника; с луговым и мезофильным разнотравьем, крапивой, хвощом, злаками в ТКЯ	СК: 0.7; S _{пп} : 90	Лесной
Топольники	25	399	Топольник вейниковый с чозенией, ивами, каменной березой, в подлеске шиповник. В ТКЯ хвощи, мезофильное разнотравье	СК: 0.3; S _{пп} : 80	Лесной
	9	191	Редкостойный топольник лишайниковый с березой белой, с рябиной и кедровым стлаником в подлеске; ТКЯ разреженный с луговыми видами, злаками. Плотный лишайниковый покров	СК: 0.1; S _{пп} : 5	Лесной
	20	25	Осинник разнотравный с белой березой, ивой и ольхой, с подлеском из рябины, шиповника, смородины и жимолости; в ТКЯ луговое и мезофильное разнотравье, злаки, василистник	СК: 0.6; S _{пп} : 60	Лесной

Растительные формации	№ точки отбора	Абс. высота точки отбора, м	Растительные формации в месте отбора пробы	Сомкнутость крон (СК); площадь проективного покрытия ТКЯ (Спп)	Высотный пояс
Ольшаники	7	71	Ольшаник редкотравный с тополем; с рябиной, черемухой, малиной, шиповником и смородиной в подлеске; с разреженным ТКЯ из злаков, хвощей, полыни	СК: 0.7; Спп: 20	Лесной
	5	22	Ольшаник разнотравный с березами каменной и плосколистной, ивой, с рябиной, смородиной, черемухой в подлеске; в ТКЯ крупнотравье, мезофильное разнотравье, злаки, осоки, с хвощами и зелеными мхами	СК: 0.4; Спп: 100	Лесной
Ивняки	18	16	Пойменный ивняк хвощово-зеленомошный с ольхой, березой; с полынью, злаками, клевером в ТКЯ	СК: 0.7; Спп: 10	Лесной
	2	12	Пойменный ивняк с подлеском из рябины, шиповника; в ТКЯ мезофильное разнотравье, хвощи	СК: 0.6; Спп: 80	Лесной
Высокогорные формации	10	247	Густой ольховник редкотравный с березой, тополем; в ТКЯ Иван-чай, анафалис жемчужный, кошачья лапка двудомная	СК: 0.8; Спп: 20	Субальпийский
	11	653	Разнотравно-гераниево-сосюреево-кровохлебковый мезофитный луг, окруженный густым ольховником редкотравным, со злаками в ТКЯ	СК ольховника: 0.9; Спп. луга: 100	Альпийский
	12	900	Разнотравно-гераниевый мезофитный луг. На микроповышениях голубично-шикшевые горно-тундровые ассоциации с рододендромом и ивой арктической	Спп: 100	Альпийский
	13	1010	Сосюреево-голубично-шикшево-рододендровая ассоциация, выше по склону переходящая в лишайниково-дриадово-ивковую	Спп: 90	Гольцовый
	14	1066	Без растительного покрова		Лесной
Сырые и болотные формации	23	84	Сырой разнотравно-осоковый луг с сабельником, ирисом, хвощами, отдельно стоящими деревьями ольхи, ивы, березы, окруженный лиственничником кустарниково-разнотравным с кедровым стлаником и багульником	Спп: 100	Лесной
	27	299	Торфяное осоково-сфагновое болото с березкой, сабельником, багульником, ерником, голубикой, восковником, окруженное лиственничником с березой и ольхой	Спп: 100	Лесной
	17	27	Осоково-болотнотравяное болото с куртинами спиреи, сабельником, окруженное ольшаником разнотравным с ивой, березой	Спп: 100	Лесной

Примечание. Нумерация точек дана в соответствии с порядком на диаграмме (рис. 2). Пробы 2 и 18 отобраны из прирусловых наилок, остальные – из почв. ТКЯ – травянисто-кустарничковый ярус.

Notes. The points are numbered according to the order in the diagram (Fig. 2). River silts were taken at points 2 and 18 for pollen analysis, soils at the other points. Herb and shrub layer.

Betula ermanii (0.3–27 %), отражающее, по всей видимости, региональное распространение каменной березы. Заметное присутствие пыльцы *Larix* и *Picea* также, вероятно, демонстрирует региональный компонент. Еще одним важным отличием можно считать повышение доли пыльцы пойменных деревьев: тополя, чозении, ольхи, ивы. Причем на тополь в тополеводниках приходится до 8 %, в то время как в других формациях его доля не

превышает 5 %. В ольшаниках доля ольхи доходит до 13 %, а ивы в ивняках – до 12 %.

Среди трав и кустарничков преобладают злаки и осоковые, но злаков относительно больше в тополеводниках и ивняках, а осоковых – в ольшаниках. Высокая доля пыльцы растений этих семейств закономерно отражает их заметную роль в травянисто-кустарничковом ярусе фитоценозов точек отбора. Также относительно много пыльцы розоцветных

(Rosaceae) в тополеводниках и ольшаниках, где в подлеске обильно шиповник (*Rosa*).

Образцы, отобранные в ивниках из прируслового наилка (18, 2), отличаются более разнообразной палинофлорой, включающей пыльцу таксонов, произрастающих в верхних высотных поясах (например, *Betula sect. Nanae*), и прибрежно-водных растений (*Potamogeton*, *Typha*, *Nuphar*, *Menyanthes*). Среди трав немного повышена доля астровых, лилейных (Liliaceae) и гречишных (Polygonaceae). Споры также наиболее многочисленны именно в СПС ивняков, главным образом *Lycopodium*, *Bryidae* и *Polypodiaceae*. По всей видимости, в аллювиальных отложениях содержится пыльца, перенесенная не только воздушным, но и водным путем с вышележащих частей водосбора рек.

На фоне остальных образцов заметно выделяются пробы 9 и 20, где на *Betula sect. Albae* приходится аномально высокий процент (68–92 %). По всей видимости, помимо того что оба эти образца отобраны в местах произрастания березы плосколистной (*Betula verrucosa* var. *platyphylla* (Sukaczew)), в пробе 9 закономерные соотношения СПС нарушены из-за возможного попадания березового пыльцевого мешка в образец. В результате количество пыльцы *Betula sect. Albae* в спектре более чем в 10 раз превосходит количество пыльцы и спор остальных растений. Эти два образца можно считать исключением.

Следующая группа объединяет спектры проб из альпийского, субальпийского и гольцового высотных поясов. На деревья и кустарники по-прежнему приходится основная часть СПС (60–97 %). NAR составляют от 2 до 39 %, споры – 0.6–6 %. В группе AP можно встретить пыльцу всех ветроопыляемых древесных пород этого региона в заметном количестве. Преобладающим таксоном остается *B. ertmanii*. Доля ее пыльцы минимальна в субальпийском ольховнике (22 %) и постепенно растет вверх по склону Ключевского вулкана до 48–55 %. СПС этой группы выделяются среди других групп повышенным содержанием (11–54 %) пыльцы кустарниковой ольхи (рис. 2), причем в зарослях *Alnus alnobetula* в субальпийском

поясе (пробы 10 и 11) ее содержание закономерно самое высокое.

NAR в данной группе отличается повышенным таксономическим разнообразием. Среди трав и кустарничков преобладает пыльца злаков и осок, но она содержится в меньшем количестве, чем в других группах (0.4–11 %). Среди постоянно присутствующих таксонов можно перечислить Liliaceae, Polygonaceae, Asteraceae, *Saussurea* (соссюрея), *Sanguisorba* (кровохлебка). Пыльца соссюреи является своеобразным индикатором принадлежности к данной группе, поскольку практически не встречается (обнаружено 1 п.з.) в пробах из лесного пояса. Наибольшее содержание пыльцы соссюреи наблюдается в обр. 13, отобранном в пределах растительной ассоциации, где соссюрея является одним из доминантов. Для этого образца характерно самое высокое содержание пыльцы трав и кустарничков по сравнению со всеми другими образцами (рис. 3), не в последнюю очередь за счет высокой доли пыльцы соссюреи. При этом СПС обр. 14 из места отбора, расположенного в 100 м от места обр. 13, но на склоне шлакового конуса выше границы растительности, имеет «лесной» облик. В нем преобладает пыльца деревьев и кустарников, главным образом каменной березы, содержится пыльца лиственницы и ели. Но вместе с тем высокое содержание пыльцы кустарниковой ольхи и присутствие пыльцы растений, характерных для альпийских лугов (*Dryas*, *Saussurea*), выдает происхождение спектра из альпийского пояса.

Сравнение СПС, полученных из разных высотных поясов растительности (рис. 3), показывает, что по соотношению пыльцы и спор растений разных жизненных форм наиболее заметно различаются спектры образцов, отобранных из альпийского пояса или на границе с ним. В таких пробах доля AP заметно ниже (60–83 %), чем в образцах из лесного и субальпийского поясов (85–97 %). Образец же 14, отобранный выше границы растительности, и по этому соотношению приближается к образцам из лесного пояса.

Последней группой стали СПС *болот и сырых лугов*. В них доля пыльцы деревьев и кустарников немного ниже, чем в других образцах (60–87 %), а доля пыльцы трав (до 27 %) и спор (до 14 %) выше. В АР преобладает пыльца *Betula ermanii*, но также относительно многочисленна пыльца *Alnus hirsuta*. Были обнаружены единичные зерна пыльцы липы (*Tilia*) в обр. 27.

В спектрах образцов этой группы присутствует пыльца растений, которые характерны для болотных местообитаний [6] и были отмечены в точках отбора проб: сабельника (*Comarum*), кровохлебки, восковника (*Myrica*) (рис. 2). Для этой группы характерна повышенная доля спор. Ярче других в этой группе выделяется хвощ (*Equisetum*), доля которого наивысшая именно в СПС болот и сырых лугов.

Кластерный анализ (рис. 4) позволил выделить группы статистически похожих СПС независимо от их приуроченности к фитоценозам. Дендрограмма демонстрирует соответствие спектров основным растительным сообществам. Граница первого уровня отделяет образцы 9 и 20 с аномальным содержанием пыльцы *B. sect. Albae*, которые мы при анализе исключили из рассмотрения. Вместе группируются образцы высокогорных местообитаний (обр. 10–14), болотных и пойменных формаций (23, 7, 5, 17, 25) и хвойных лесов (21, 28, 15, 24, 26, 3, 16). Таким образом, кластеризация подтверждает, что СПС отражают растительные сообщества, в которых они формировались, несмотря на локальные условия и влияние регионального компонента.

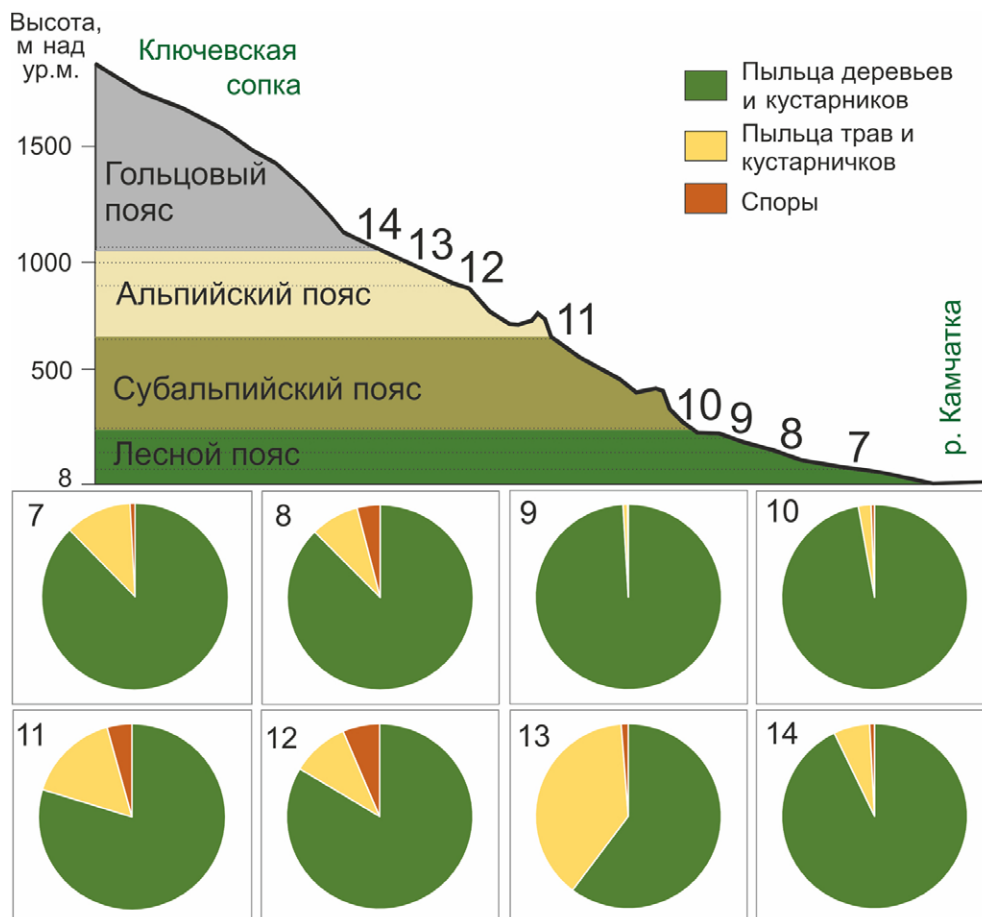


Рис. 3. Диаграммы распределения общего состава пыльцевых спектров по высотным поясам растительности на склонах влк. Ключевская сопка. Цифрами от 7 до 14 обозначены точки отбора поверхностных проб в соответствии с рис. 2 и табл. 1.

Fig. 3. Diagrams of distribution of the total pollen spectra composition by altitudinal zones of vegetation on the slopes of Klyuchevskaya Sopka volcano. Numbers from 7 to 14 indicate surface sampling points according to Figure 2.

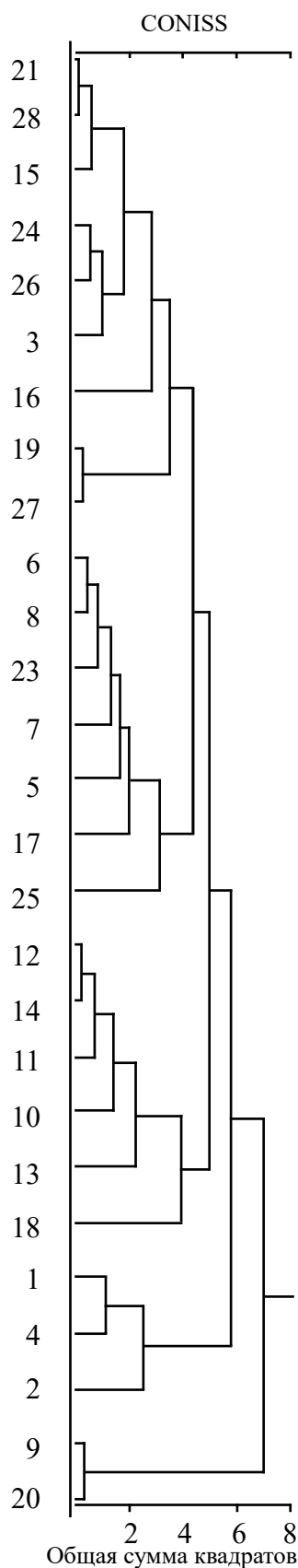


Рис. 4. Дендрограмма сходства субфоссильных спорово-пыльцевых спектров Центральной Камчатской депрессии.

Fig. 4. Dendrogram of similarity of subfossil pollen assemblages of Central Kamchatka depression.

Обсуждение результатов

Наши данные подтверждают несоответствие содержания пыльцы некоторых деревьев и кустарников их реальной роли в фитоценозе. Так, благодаря высокой пыльцевой продуктивности и форме, способствующей воздушному переносу, пыльца берез доминирует во всех образцах, даже отобранных вне лесного пояса. В.П. Гричук и Е.Д. Заклинская [7] относили пыльцу березы к региональным компонентам спектра. Наибольшие содержания пыльцы *Betula ermanii* обнаружены именно в СПС проб из каменных березняков (рис. 2; табл. 1). Следовательно, этот факт можно использовать в качестве диагностического признака березовых лесов, но в сочетании с другими компонентами спектров.

Многokратно описанное занижение доли пыльцы лиственницы в осадках по сравнению с реальным участием этой породы в составе древостоев наблюдается и в наших пробах. Это явление связано с плохой сохранностью при фоссилизации пыльцевых зерен лиственницы. Например, О.А. Брайцева с соавторами [1], проводившие исследования в том же регионе, установили, что в еловых и лиственничных лесах доля пыльцы *Larix* не превышает 4–5 % от суммы пыльцы деревьев и кустарников, а иногда и вовсе отсутствует. С учетом того, что в указанной работе [1] процентная доля рассчитывалась относительно суммы пыльцы деревьев и кустарников (AP), а в нашей работе – относительно суммарного количества пыльцы наземных растений, включая также травы и кустарнички (AP+NAP), цифры в обеих работах соответствуют друг другу. З.Н. Петраш и соавторы [16], изучавшие поверхностные спектры хвойных лесов европейской части России, тоже отмечали, что на пыльцу лиственницы приходится только около 1.5 % от общей суммы пыльцы. В дельте р. Лена в СПС густых лиственничников доля *Larix* составляет 4–10 % [17] (от AP+NAP), на Северном Сахалине – в среднем 1.5 % [18] (от AP+NAP). На основании наших данных можно заключить, что даже если доля пыльцы лиственницы в СПС невелика, можно говорить о ее заметном участии в составе древостоев не только на локальном уровне, но и

на окружающей территории в целом, поскольку в некоторых пробах, собранных нами даже в березовых лесах, в пойменных ольшаниках и тополеводниках, доля пыльцы лиственницы была 1–4 % (рис. 2).

В СПС еловых лесов пыльца ели занимает вторую позицию, а преобладает во всех пробах пыльца каменной березы. В европейской части России на пыльцу ели в ельниках приходится от 5 [16] до 15–18 % [19] от суммы пыльцы деревьев и трав в образце. Отчасти такое занижение доли пыльцы ели в спектре по сравнению с реальным участием в древостое может быть связано с тем, что ель активно «пылит» только раз в 5–6 лет, а в другие годы ее пыльцевая продуктивность очень низкая [16].

Рассмотрим различия СПС лесного, субальпийского и альпийского поясов растительности. Е.М. Малаева [2], изучив образцы с северной Камчатки, отобранные в пределах лесного и субальпийского поясов, заключила, что в каждом поясе СПС содержат пыльцу соответствующих ему деревьев и кустарников. И.С. Евтеева, описывая СПС поверхностных проб Камчатки, взятых выше границы леса, пришла к выводу, что даже при наличии высотной поясности спектры отражают в общих чертах характер растительности гораздо более обширных территорий [1].

В СПС горных территорий в пробах, отобранных нами выше границы леса, доминирует пыльца деревьев и кустарников. Это отмечали исследователи и других горных территорий. Например, на Южном Сихотэ-Алине [20] и на Южном Урале [21] во всех пробах преобладает пыльца деревьев, независимо от высотной поясности. По нашим данным, в субальпийском поясе такое преобладание достигается за счет высокой доли пыльцы кустарниковой ольхи (рис. 2). В этом высотном поясе на северном макросклоне влк. Ключевская сопка, где *Alnus alnobetula* является доминантом верхнего яруса фитоценозов, на ее пыльцу приходится до 54 % от суммы пыльцы в образце. Это заметно отличает образцы из субальпийского пояса от других проб. В образцах, отобранных на склонах Срединного хребта (24, 25, 26), где в сообществах большую роль играет кедровый стланик, содержание пыльцы *Pinus pumila*

выше (10–13 %), чем в других пробах (рис. 2). Участие региональных компонентов спектров (пыльца ветроопыляемых деревьев, в первую очередь берез) в СПС альпийского и гольцового поясов (рис. 3) достигается за счет переноса пыльцы восходящими потоками воздуха в летнее время [20, 21].

Анализируя субфоссильные СПС из соседних регионов, в частности с Курильских островов [22], исследователи приходят к выводу, что на островах в пределах возвышенностей с лугово-разнотравной растительностью на долю пыльцы деревьев и кустарников приходится не более 18 %, при этом преобладает пыльца разнотравья (до 43 %) и споры (до 18 %). Пыльца деревьев главным образом заносная, т.е. принадлежит растениям, которые не встречаются на исследуемых островах [22]. Это важное наблюдение, которое показывает, что в условиях распространения лесной растительности в регионе пыльца основных древесных пород будет доминировать в СПС независимо от того, отобран ли образец в пределах лесного, субальпийского, альпийского или гольцового пояса. Пыльца трав и кустарников выходит на первый план только при отсутствии сомкнутых лесов в регионе.

СПС рецентных проб с пойменных и заболоченных участков выделяются в первую очередь за счет повышенного содержания пыльцы влаголюбивых растений – *Alnus hirsuta*, *Salix*, реже *Populus*, а также *Rosaceae*, *Cyperaceae* и реже – спор папоротников и хвощей (*Equisetum*). Это полностью соответствует составу локальной растительности, поскольку в пойменных лесах часто доминируют ольха и ива с боярышником, рябиной, черемухой и шиповником в подлеске. Травянистый ярус обычно представлен злаками, осоками и разнотравьем, но при этом доля пыльцы злаков в СПС оказывается заниженной по сравнению с их реальным участием в составе сообщества. Пробы из влажных местообитаний содержат в заметном количестве пыльцу растений из семейства лилейных. Для СПС болот характерно присутствие пыльцы сабельника (*Comarum*). Как и другие исследователи [23], мы можем заключить, что роль пыльцы этих растений сильно зависит от локальных условий, поэто-

му доля их пыльцы в СПС изменяется в широком диапазоне: на *Alnus hirsuta* приходится от 6 до 14 %, на *Salix* – от 2 до 25 %.

Состав СПС из поверхностных проб в значительной степени зависит от генезиса изучаемых отложений. Например, было установлено, что в аллювиальных русловых отложениях содержание пыльцы кустарниковой ольхи и кедрового стланика завышено по сравнению с их участием в растительности района [2]. Мы исследовали спектры из прирусловых наилок (обр. 18 и 2) и заключили, что они характеризуются наибольшим таксономическим разнообразием. Обр. 18 отобран из аллювия р. Сухая, которая дренирует северо-восточный склон влк. Ключевская сопка в его предгорной части. Помимо пыльцы ольхи и ивы (локальный компонент палинокомплекса) его СПС содержит пыльцу из всех высотных поясов, через которые протекает река: пыльцу хвойных пород и берез, кустарниковой ольхи, березки тощей и можжевельника. Таким образом, СПС аллювиальных отложений отражают состав растительности в бассейне реки в целом.

Важно упомянуть немногочисленные находки дальнезаносной пыльцы в рецентных пробах. В первую очередь ее присутствие заметно по пыльце липы, единичные зерна которой встретились в обр. 27. Поскольку липа не растет не только на Камчатском п-ове, но и на соседних территориях северной Евразии, можно уверенно говорить о дальнем переносе ее пыльцы. Способность пыльцы липы переноситься за сотни километров от ее ареала была описана в различных работах [7, 24, 25]. Несмотря на географическую изолированность ЦКД, наши данные свидетельствуют о том, что воздушный занос пыльцы с очень отдаленных территорий в ЦКД возможен.

Заключение

Проанализировав полученные материалы, заключаем, что спорово-пыльцевые спектры почв и аллювиальных отложений в разной степени отражают состав локальной и региональной растительности, распространенной как в Центральной Камчатской депрессии, так и на окружающих ее горных склонах. Кластерный анализ показывает, что наиболее близкие

СПС формируются в схожих фитоценозах, что подтверждает адекватность СПС соответствующим растительным сообществам. При этом обилие пыльцы региональных компонентов спектров (ветроопыляемых древесных пород с высокой пыльцевой продуктивностью) искажает соотношения основных компонентов СПС по сравнению с составом локальной растительности, особенно в верхних высотных поясах.

В лесных СПС на фоне повсеместно высокой доли пыльцы берез выделяется повышенное содержание пыльцы лесообразующей породы: в ельниках на пыльцу *Picea* приходится 28 %, в лиственничниках на пыльцу *Larix* – 2–5 %. В каменных березняках доля пыльцы *Betula ermanii* в среднем 77 %, и эта доля выше, чем в среднем в современных пробах из других лесных сообществ. Во всех исследованных образцах, даже в пробах из альпийского и гольцового поясов, преобладает пыльца деревьев и кустарников, которая отражает региональный компонент. Полученные материалы могут быть использованы для реконструкции изменений растительности в голоцене.

Можно выделить индикаторы локальных условий, которые позволяют различить СПС, формировавшиеся в разных местообитаниях. Наиболее сильно локальный сигнал прослеживается в образцах, отобранных на заболоченных территориях, а также выше границы леса (разнообразие пыльцы луговых и тундровых растений). Кроме того, на формирование СПС существенно влияет генезис осадка. Наша работа совместно с данными других исследований позволит сделать реконструкции по палинологическим данным более обоснованными.

Список литературы

1. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Евтеева И.С., Лупикина Е.Г. **1968**. *Стратиграфия четвертичных отложений и оледенения Камчатки*. М.: Наука, 245 с.
2. Боярская Т.Д., Малаева Е.М. **1967**. *Развитие растительности Сибири и Дальнего Востока в четвертичном периоде*. М.: Наука, 201 с.
3. Скиба Л.А. **1975**. *История развития растительности Камчатки в позднем кайнозое*. М.: Наука, 72 с.
4. Гришин С.Ю. **1996**. *Растительность субальпийского пояса Ключевской группы вулканов*. Владивосток: Дальнаука, 156 с.

5. Сырьевые ресурсы Камчатской области: Материалы выездной сессии Комис. по проблемам Севера в 1957 г. **1961**. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 184 с.
6. Нешатаева В.Ю. **2009**. *Растительность полуострова Камчатка*. М.: КМК, 537 с.
7. Гричук В.П., Заклинская Е.Д. **1948**. *Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии*. М.: ОГИЗ, Географгиз, 224 с.
8. Мазей Н.Г., Новенко Е.Ю. **2021**. Применение пропионового ангидрида при пробоподготовке проб для спорово-пыльцевого анализа. *Nature Conservation Research. Заповедная наука*, 6(3): 110–112. <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2021.036>
9. Мячина А.И., Казачихина Л.Л., Мамонтова И.Б., Калинина В.С. **1971**. *Атлас спор и пыльцы некоторых современных растений Дальнего Востока*. Хабаровск: ХабКНИИ ДВНЦ АН СССР, 86 с.
10. Куприянова Л.А., Алешина Л.А. **1972**. *Пыльца и споры растений флоры европейской части СССР*. Т. 1. Л.: Наука, 184 с.
11. Куприянова Л.А., Алешина Л.А. **1978**. *Пыльца двудольных растений флоры Европейской части СССР. Lamiaceae-Zygophyllaceae*. Л.: Наука, 183 с.
12. Бобров А.Е., Куприянова Л.А., Литвинцева М.В., Тарасевич В.Ф. **1983**. *Споры папоротникообразных и пыльца голосеменных и однодольных растений флоры Европейской части СССР*. Л.: Наука, 303 с.
13. Moore P.D., Webb J.A., Collison M.E. **1991**. *Pollen analysis*. Oxford: Blackwell scientific publications, 216 p.
14. Grimm E.C. **1990**. TILIA and TILIA GRAPH.PC spreadsheet and graphics software for pollen data. *INQUA, Working Group on Data-Handling Methods. Newsletter*, 4: 5–7.
15. Якубов В.В., Чернягина О.А. **2004**. *Каталог флоры Камчатки (сосудистые растения)*. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 165 с.
16. Петраш З.Н., Леунова В.М., Зиновьева О.А. **2012**. Формирование поверхностных спорово-пыльцевых спектров в хвойных насаждениях *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 14 (1-6): 1512–1514. EDN: RBVQXB
17. Рашке Е., Савельева Л.А. **2017**. Субрецентные спорово-пыльцевые спектры и современная растительность дельты реки Лена, Российская Арктика. *Сибирский экологический журнал*, (4): 456–472. <http://dx.doi.org/10.15372/SEJ20170407>
18. Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. **2009**. *Субфоссильные спорово-пыльцевые комплексы Сахалина и прилегающих территорий*. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 160 с.
19. Новенко Е.Ю., Мазей Н.Г., Зерницкая В.П. **2017**. Рецентные спорово-пыльцевые спектры заповедных территорий Европейской части России как ключ к интерпретации результатов палеоэкологических исследований. *Nature Conservation Research. Заповедная наука*, 2(2): 55–65. <http://dx.doi.org/10.24189/ncr.2017.012>; EDN: VZQNVK
20. Мохова Л.М., Кудрявцева Е.П. **2022**. Субфоссильные спорово-пыльцевые спектры как отражение высотной поясности Южного Сихотэ-Алиня. *Геосистемы переходных зон*, 6(1): 43–53. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.043-053>
21. Лаптева Е.Г. **2013**. Субфоссильные спорово-пыльцевые спектры современной растительности Южного Урала. *Вестник Башкирского ун-та*, 18(1): 77–81. EDN: PYVRPH
22. Мохова Л.М. **2021**. Субфоссильные спорово-пыльцевые спектры как отражение ландшафтного разнообразия островов Малой Курильской гряды. *Биота и среда природных территорий*, 1: 3–30. http://doi.org/10.37102/2782-1978_2021_1_1; EDN: ННИКЕМ
23. Новенко Е.Ю., Мазей Н.Г., Куприянов Д.А., Филимонова Л.В., Лаврова Н.Б. **2021**. Субфоссильные спорово-пыльцевые спектры лиственничных лесов центральной Эвенкии: особенности интерпретации для целей палеоэкологических исследований. *Экология*, (6): 403–411. <http://doi.org/10.31857/S0367059721060093>
24. Мазей Н.Г., Кусильман М.В., Новенко Е.Ю. **2018**. Встречаемость пыльцы *Carpinus*, *Fagus*, *Tilia* и *Quercus* в субрецентных спорово-пыльцевых спектрах Восточно-Европейской равнины: к вопросу о возможности дальнего заноса пыльцы. *Экология*, (6): 431–439. <http://doi.org/10.1134/S0367059718050074>
25. Мохова Л.М., Еременко Н.А. **2020**. Состав спорово-пыльцевого дождя на острове Кунашир (Курильские острова). *Биота и среда заповедных территорий*, 2: 3–37. <https://doi.org/10.25808/26186764.2020.15.81.001>; EDN: XLMZSH

References

1. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Evteeva I.S., Lupikina E.G. **1968**. [*Stratigraphy of Quaternary deposits and glaciation of Kamchatka*]. Moscow: Nauka, 245 p. (In Russ.).
2. Boyarskaya T.D., Malaeva E.M. **1967**. [*Development of vegetation of Siberia and the Far East in the Quaternary*]. Moscow: Nauka, 201 p. (In Russ.).
3. Skiba L.A. **1975**. [*History of the development of vegetation of Kamchatka in the Late Cenozoic*]. Moscow: Nauka, 72 p. (In Russ.).
4. Grishin S.Yu. **1996**. *The vegetation of subalpine zone of Klyuchevskaya volcano group*. Vladivostok: Dalnauka, 156 p. (In Russ.).
5. [*Raw material resources of the Kamchatka region: Materials of the visiting session of the Commission*

- on the problems of the North in 1957]. 1961. Moscow: Izd-vo Akad. nauk SSSR, 184 p. (In Russ.).
6. Neshataeva V.Yu. 2009. *Vegetation of the Kamchatka Peninsula*. Moscow: KMK, 537 p. (In Russ.).
 7. Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. 1948. [*Analysis of fossil pollen and spores and its application to paleogeography*]. Moscow: OGIz, Geografiz, 224 p. (In Russ.).
 8. Mazei N.G., Novenko E.Yu. 2021. The use of propionic anhydride in the sample preparation for pollen analysis. *Nature Conservation Research. Reserve science*, 6(3): 110–112. <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2021.036>
 9. Myachina A.I., Kazachikhina L.L., Mamontova I.B., Kalinina V.S. 1971. [*Atlas of spores and pollen of some modern plants of the Far East*]. Khabarovsk, 86 p. (In Russ.).
 10. Kupriyanova L.A., Aleshina L.A. 1972. *Pollen and spores of plants from the flora of the European part of the USSR*. Vol. 1. Leningrad: Nauka, 184 p. (In Russ.).
 11. Kupriyanova L.A., Aleshina L.A. 1978. [*Pollen of dicotyledonous plants from the flora of the European part of the USSR. Lamiaceae-Zygophyllaceae*]. Leningrad: Nauka, 183 p. (In Russ.).
 12. Bobrov A.E., Kupriyanova L.A., Litvintseva M.V., Tarasevich V.F. 1983. [*Spores of ferns and pollen of gymnospermous and monocotyledonous plants of the flora of the European part of the USSR*]. Leningrad: Nauka, 303 p. (In Russ.).
 13. Moore P.D., Webb J.A., Collison M.E. 1991. *Pollen analysis*. Oxford: Blackwell scientific publications, 216 p.
 14. Grimm E.C. 1990. TILIA and TILIA GRAPH.PC spreadsheet and graphics software for pollen data. *INQUA, Working Group on Data-Handling Methods. Newsletter*, 4: 5–7.
 15. Yakubov V.V., Chernyagina O.A. 2004. *Catalog of the flora of Kamchatka (vascular plants)*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 165 p. (In Russ.).
 16. Petrash Z.N., Leunova V.M., Zinovyeva O.A. 2012. The formation of surface pollen spectra in coniferous stands. *Izvestiya of the Samara Russian Academy of Sciences Scientific Center*, 14(1-6): 1512–1514. (In Russ.). EDN: RBVQXB
 17. Raschke E.A., Savelieva L.A. 2017. Subrecent spore-pollen spectra and modern vegetation from the Lena River Delta, Russian Arctic. *Contemporary Problems of Ecology*, 10: 395–410. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/s1995425517040084>
 18. Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G. 2009. *Subfossil spore-pollen complexes of Sakhalin Island and adjacent areas*. Vladivostok: Publ. of Far Eastern National University, 160 p. (In Russ.).
 19. Novenko E.Yu., Mazei N.G., Zernitskaya V.P. 2017. Recent pollen assemblages from protected areas of European Russia as a key to interpreting the results of paleoecological studies. *Nature Conservation Research. Reserve science*, 2(2): 55–65. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2017.012> ; EDN: VZQNVK
 20. Mokhova L.M., Kudryavtseva E.P. 2022. Subfossil pollen spectra as evidence of the altitudinal zonation of the Southern Sikhote-Alin. *Geosistemy peredodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 6(1): 43–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.043-053>
 21. Lapteva E.G. 2013. Subfossil pollen spectra of modern vegetation in Southern Urals. *Vestnik Bashkirskogo unta*, 18(1): 77–81. (In Russ.). EDN: PYVRPH
 22. Mokhova L.M. 2021. Subfossil spore-pollen spectra as a reflection of the landscape diversity of the Lesser Kuril Ridge. *Biodiversity and Environment of Natural Areas*, 1: 3–30. (In Russ.). http://doi.org/10.37102/2782-1978_2021_1_1; EDN: HHIKEM
 23. Novenko E.Y., Mazei N.G., Kupriyanov D.A., Filimonova L.V., Lavrova N.B. 2021. Subfossil spore-pollen spectra from larch forests of central Evenkia: special aspects of interpretation for paleoecological research purposes. *Russian Journal of Ecology*, 52(6): 429–437. <http://doi.org/10.31857/S0367059721060093>
 24. Mazei N.G., Kusilman M.V., Novenko E.Y. 2018. The occurrence of *Carpinus*, *Fagus*, *Tilia*, and *Quercus* pollen in subrecent spore-pollen spectra from the East European plain: on the possibility of long-distance pollen transfer. *Russian Journal of Ecology*, 49(6): 484–491. <https://doi.org/10.1134/s1067413618050077>
 25. Mokhova L.M., Eremenko N.A. 2020. Pollen rain composition on Kunashir Island (Kuril Islands). *Biodiversity and Environment of Protected Areas*, 2: 3–37 (In Russ.). DOI: 10.25808/26186764.2020.15.81.001; EDN: XLMZSH

Об авторе

Мухаметшина Екатерина Олеговна (<https://orcid.org/0000-0002-7305-2632>), инженер-исследователь, отдел палеогеографии Четвертичного периода Института географии РАН, Москва, comukhametshina@igras.ru

Поступила 13.03.2024

Принята к публикации 05.06.2024

About the Author

Mukhametshina, Ekaterina O. (<https://orcid.org/0000-0002-7305-2632>), Research Engineer, Department of Quaternary Paleogeography, Institute of Geography RAS, Moscow, Russia, comukhametshina@igras.ru

Received 13 March 2024

Accepted 5 June 2024

© Автор 2024 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author 2024. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.8+561(271.64)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.142-152>
<https://www.elibrary.ru/hbzaau>

Особенности формирования субфоссильных спорово-пыльцевых спектров острова Кетой (Центральные Курилы)

Л. М. Мохова

E-mail: nadyar@tigdvo.ru

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Резюме. Проведен анализ состава и соотношения основных компонентов спорово-пыльцевых спектров из поверхностного слоя торфяников, почв, отложений озер и аллювиальных наилок в разных частях о. Кетой (Центральные Курилы), который, несмотря на небольшие размеры, отличается сложной организацией ландшафтов. Независимо от генезиса отложений пыльцевые спектры хорошо отражают локальную растительность в местах сбора проб. Пыльца, занесенная с сопредельных территорий, существенного влияния на состав пыльцевых спектров не оказывает. Спектры почвенных отложений юго-восточной части острова представлены пыльцой вересковых; юго-западной части – пыльцой деревьев, среди них доминирует пыльца кедрового стланика, ольховника и березы. В группе пыльцы трав преобладают астровые и вересковые. Спектры, полученные из пионерных почв западной части острова, формируют споры плауна булавовидного (*Lycopodium clavatum*), что отражает сообщества на зарастающих отложениях обвалов. В спектрах поверхностного слоя торфяников в большом количестве присутствует пыльца осоковых и злаков. Спектры аллювиальных наилок отражают растительность долин низкопорядковых водотоков, где распространены ольховник, кедровый стланик, а по бортам – каменная береза. Спектры верхнего слоя осадков небольших озер очень хорошо отражают локальные биоценозы. В незначительном количестве, за исключением двух проб, в спектрах присутствует аллохтонная пыльца темнохвойных и широколиственных древесных пород. Эта пыльца переносится с южных островов, в том числе Японских. Полученные данные можно использовать для палеогеографических реконструкций при анализе формирования палиноспектров на малых океанических островах.

Ключевые слова: островные ландшафты, спорово-пыльцевой анализ, растительность, аллювиальные и озерные наилки, торфяники, пионерные почвы, Курильские острова

Special aspects of the formation of subfossil pollen assemblages from Ketai Island (Central Kuril Islands)

Ljudmila M. Mokhova

E-mail: nadyar@tigdvo.ru

Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. The composition and ratios of main components of pollen assemblages from the surface layer of peatlands, soils, lake sediments, and alluvial silts in different parts of the Ketai Island were analyzed. The island, despite its small size, is distinguished by a complex organization of the landscapes. The pollen spectra represent well the local vegetation at the sampling sites, regardless of the genesis of sediments. Pollen brought from adjacent territories does not have a significant effect on the composition of pollen spectra. The spectra from soil deposits in the southeastern part of the island are represented by heather pollen; in the southwestern part, by tree pollen, mostly Siberian dwarf pine, alder, and birch pollen. Among nonarborescent pollen, Asteraceae and Ericaceae are dominant. The pollen spectra obtained from pioneer soil in the western part of the island consist of club moss spores (*Lycopodium clavatum*), which represent communities on overgrown rockfall deposits. The assemblages of the surface layer of peatlands contain large amounts of sedge and grass pollen. The pollen spectra from alluvial silts represent the vegetation of small valleys, where alder, dwarf pine, and Erman's birch along the sides are common. The pollen spectra from the surface sediments of small lakes represent local

biotic communities very well. Allochthonous pollen of dark coniferous and broad-leaved trees is present in the spectra in small quantities, except for two samples. This pollen was brought from the southern islands, including those of Japan. The data obtained can be used for paleogeographic reconstructions in the analysis of the formation of pollen spectra on small oceanic islands.

Keywords: island landscapes, pollen analysis, vegetation, alluvial and lacustrine silts, peatland, pioneer soils, Kuril Islands

Для цитирования: Мохова Л.М. Особенности формирования субфоссильных спорово-пыльцевых спектров острова Кетой (Центральные Курилы). *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 2, с. 142–152. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.2.142-152>; <https://www.elibrary.ru/hbzaau>

For citation: Mokhova L.M. Special aspects of the formation of subfossil pollen assemblages from Ketai Island (Central Kuril Islands). *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 2, pp. 142–152. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.2.142-152>; <https://www.elibrary.ru/hbzaau>

Финансирование и благодарности

Работа выполнена по теме государственного задания Тихоокеанского института географии ДВО РАН (№ 122020900184-5). Экспедиционные работы проводились в рамках Курильского биоконкомплексного проекта, финансируемого Национальным научным фондом США (грант ARC-0508109, руководитель Бен Фицью). Автор благодарит уважаемых рецензентов за конструктивные замечания, способствующие улучшению данной публикации.

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (No. 122020900184-5). The field work was conducted within the framework of the Kuril Biocomplexity Project funded by the United States National Science Foundation (grant ARC-0508109, principal investigator Ben Fitzhugh). The author thanks the respected Reviewers whose constructive suggestions contributed to the improvement of this article.

Введение

Длительная и сложная история развития природной среды Курильских островов предопределила уникальность и специфику ландшафтной структуры территории. Комплекс зональных и аazonальных ландшафтообразующих факторов, главным из которых является тектоническая и вулканическая активность, нашел отражение в ландшафтной организации островов Курильской гряды [1] и во многом определил эволюцию ландшафтов в голоцене. К настоящему времени получены данные по истории развития практически всех островов из группы Центральных Курил [2–4], в том числе и для о. Кетой [5], но субфоссильным спектрам уделялось мало внимания.

Анализ современных спорово-пыльцевых спектров и их соответствия растительности является важным этапом при изучении развития ландшафтов конкретных территорий [6–8] и проводится в разных регионах Дальнего Востока [9–11]. Для Курильских островов такие исследования выполнены для юга

[12, 13], где установлено, что субфоссильные палиноспектры в целом адекватно отражают растительность на уровне биома, в отличие от континентальных территорий с большими водосборными бассейнами; генезис отложений не имеет большого влияния на их формирование; выявлено присутствие аллохтонной древесной пыльцы, поступающей с сопредельных островных территорий [14].

Целью данной работы является изучение субфоссильных спорово-пыльцевых спектров, полученных из осадков различного генезиса, сформированных в разных природно-территориальных комплексах о. Кетой (рис. 1), для сопоставления спектров с современной растительностью и оценки их соответствия окружающим растительным ассоциациям.

Краткая характеристика района

Кетой, остров средней группы Большой гряды Курильских островов, омывается с запада и востока водами Охотского моря и Тихого океана соответственно*. Площадь острова

* Физико-географические сведения об острове приводятся по: *Справочник по физической географии Сахалинской области*. 2003. Южно-Сахалинск: Сахалинское кн. изд-во, 112 с.

составляет 71 км² [1]. На юге он отделяется проливом Дианы (ширина – 18.5 км, глубина – до 400 м) от о. Симушир, на севере – проливом Рикорда (ширина – 25.9 км, глубина – 200 м) от островов Ушишир. Остров Кетой образован группой вулканов, основную часть территории занимает сомма древнего вулкана с кальдерой диаметром 5–5.5 км. Хорошо выражена молодая центральная постройка, современный внутрикальдерный активный конус – Пик Палласа [15]. Наивысшая точка острова – около 1172 м. Гидрологическая сеть на вулканических постройках развита крайне неравномерно. Большинство водотоков являются временными и нередко пересыхают. Озера на острове (Малахитовое и Глазок) имеют вулканическое происхождение.

Климат на острове* океанический, с небольшой разницей между средними зимними и летними температурами. В районе Центральных Курил, по данным метеонаблюдений на островах Симушир и Матуа, среднегодовая температура составляет 1.6–2.5 °С, минимальная –27 °С, максимальная +29 °С. Зима относительно теплая: средняя температура февраля –6.3...–5.8 °С, лето прохладное, самый теплый месяц август – средняя температура 10.9–11.0 °С, среднегодовое количество осадков 1213–1610 мм. Высота снежного покрова варьирует от 16 до 110 см, снежники в верховьях долин могут сохраняться все лето. Характерны сильные туманы, количество ясных дней не превышает 7 за год. В данном районе отмечено максимальное количество дней с сильным ветром (>15 м/с) – до 185 в год. Проливы Дианы и Рикорда не замерзают. С тихоокеанской стороны острова проходит холодное течение Оясио, оказывающее существенное влияние на климат Центральных Курил.

Согласно флористическому районированию Курильских островов, о. Кетой относится к Средне-Курильскому району, флористическую обособленность которого обеспечивают восточноазиатские элементы флоры: бамбучник (*Sasa kurilensis*), тис остроконечный

(*Taxus cuspidata*) и каменная береза (*Betula ermanii*) [16–18]. Склоны влк. Кетой покрыты кедровым стлаником (*Pinus pumila*). Видовой состав кедрово-стланиковых зарослей очень беден. Они часто смешаны с зарослями каменной березы и ольховника. На острове также широко распространен ольховник кустарниковый (*Duschekia fruticosa*) с разреженным травянистым покровом или кустарниковым подлеском. Остров Кетой является северным пределом распространения бамбучника, который широко представлен на всем острове. Повсеместно встречаются разнотравные и злаково-разнотравные луга. Главным условием их формирования является хорошая дренированность почв. Высокотравье, образованное в основном белокопытником, свойственно морским берегам и долинам водотоков.

На о. Кетой вдоль береговой полосы распространены ландшафты абразионно-денудационных уступов с валунно-галечными пляжами и штормовыми валами, с травянистыми сообществами и высокотравьем на маломощных дерновых почвах [1]. Юго-западную часть острова занимают ландшафты вулканических плато, для которых, как и для южной части острова, характерны заросли кедрового стланика, каменной березы и ольховника с бамбучниково-разнотравными лугами. В северной части распространены заросли кедрового стланика, каменной березы и ольховника. На повышенных местах доминирует кедровый стланик и распространены бамбучниково-разнотравные луга, а в понижениях преобладают каменная береза и ольховник. В верхних частях склонов растительность уничтожена в результате последних извержений. На крутых склонах кальдеры значительные площади занимают заросли каменной березы, ольховника и кедрового стланика с бамбучниково-разнотравными лугами. На восточном и южном склонах кальдеры растительность представлена зарослями кедрового стланика, каменной березы и ольховника. В западной части распространены абразионно-денудационные

* Сведения о климате острова по: *Справочник по климату СССР*. Вып. 34. *Сахалинская область*. Л.: Гидрометеиздат. 1970. Ч. 2. 200 с.; 1968. Ч. 3. 248 с.; Ч. 4. 172 с. [*USSR climate guide*]. Vol. 34. *Sakhalin Region*. Leningrad: Gidrometeoisdat. 1970. Pt 2. 200 p. 1968. Pt 3. 248 p.; Pt 4. 172 p. (In Russ.).

уступы с разреженной травянистой растительностью. В долинах временных и постоянных водотоков встречаются заросли каменной березы с ольховником, кедровым стлаником и бамбучниково-разнотравными лугами, нижние части долин занимает высокотравье [1].

Материалы и методы

Материал для изучения субфоссильных спектров с кратким описанием окружающих растительных ассоциаций был собран Н.Г. Разжигаевой (Тихоокеанский институт географии ДВО РАН) во время экспедиции 2006 г. (рис. 1). Отбирались пробы из поверхностного слоя почв, торфяников (очес), аллювиальных наилок, верхнего слоя осадков небольших озер. Всего изучено 16 проб. Обработка проб проводилась сепарационным методом с использованием тяжелой жидкости $\text{H}_2\text{O}:\text{CdI}_2:\text{KI}$ (2.2 г/см^3) без ацетолита. Рассчитывалось соотношение трех групп: 1) пыльца древесных пород и кустарников, 2) пыльца трав и кустарничков, 3) споры. Расчет пропорций отдельных таксонов проводился в каждой группе. Кластерный анализ выполнен с помощью пакета программ Past 3.26 [19]. В качестве меры сходства выбран коэффициент корреляции.

Для кластерного анализа из состава палиноспектров исключены аллохтонные таксоны.

Результаты

Современные осадки о. Кетой включают богатые спорово-пыльцевые спектры. Исключением является одна проба (наилок ручья Горчичный), где встречены единичные зерна пыльцы и споры. Найдена пыльца 18 таксонов древесных пород и кустарников, 18 травянистых и кустарничков и споры 7 споровых растений.

В юго-восточной части о. Кетой (рис. 1) отбор аллювиальных осадков проводился в ручье Сточный и рядом расположенном временном водотоке. Долина ручья покрыта высокотравьем (преобладает белокопытник). По бортам долины распространен кедровый стланик, ольховник и каменная береза, в травянистом покрове – папоротник семейства полиподиевых и плауны. Спорово-пыльцевые спектры (пробы 32, 39) содержат большое количество пыльцевых зерен (п.з.) и спор, в сумме 1296–2822 шт. На долю пыльцы древесных растений приходится от 532 до 1937 п.з., трав – от 311 до 51 п.з., спор – от 453 до 834 шт. Среди древесных видов (содержание от 41 до 69 %)

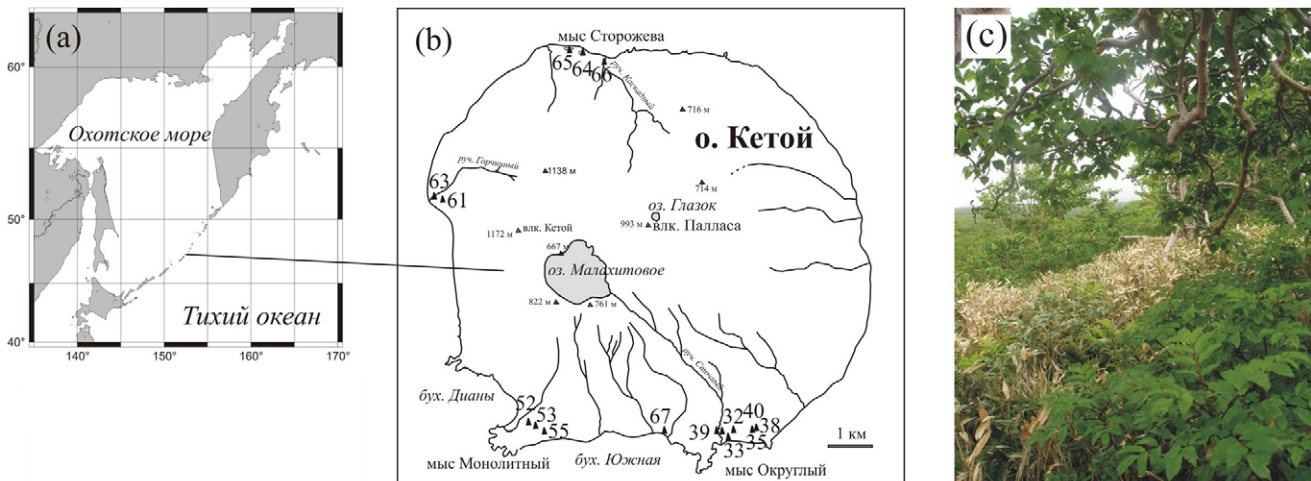


Рис. 1. Район исследований. (а) Положение о. Кетой в цепи Курильских островов, (б) расположение точек отбора проб (номером 64 обозначены пробы 0/64 и 00/64), (с) каменноберезняк (*Betula ermanii*) с рябиной смешанной (*Sorbus commixta*) и бамбучником (*Sasa kurilensis*), (д) болото на плато в южной части острова и окружающая растительность.

Fig. 1. Study area. (a) Position of Ketoi Island in the Kuril Islands chain, (b) location of sampling sites (black triangles) on Ketoi Island, (c) Erman's birch (*Betula ermanii*) forest with mountain ash (*Sorbus commixta*) and dwarf bamboo (*Sasa kurilensis*), (d) swamp on the plateau in southern part of the island with surrounding vegetation.

отмечена пыльца ольховника (*Duschekia*), кедрового стланика (*Pinus s/g Haploxyylon*, от 10 до 14 %), каменной березы (*Betula sect. Costatae*, 4–12 %). Единично встречена пыльца ели (*Picea*), сосны (*Pinus s/g Diploxyylon*), ольхи (*Alnus*), березы (*Betula sp.*) и восковника (*Myrica*). Разнотравье представлено главным образом пыльцой сложноцветных (*Asteraceae*, 58–80 %), злаков (*Poaceae*, до 39 %), включая и пыльцу бамбучника. В небольших количествах встречается пыльца лютиковых (*Ranunculaceae*), вересковых (*Ericaceae*), зонтичных (*Apiaceae*). Встречено много спор папоротников (*Polypodiaceae*, 89–98 %), найдены споры плаунов (*Lycopodium clavatum*, *Lycopodium sp.*) и плаунка (*Selaginella*) (рис. 2).

Небольшие участки на плато в южной части острова заняты шикшевником с участием кустарниковой ивы (*Salix kurilensis*). Спорно-пыльцевой спектр из почвы (проба 33), отобранной под шикшевником (*Empetrum sibiricum*), содержит среднее количество пыльцы и спор (432). На долю пыльцы *Ericaceae* приходится 99.7 % от всей пыльцы из группы трав и кустарничков. Споры представлены *Polypodiaceae*, 32 % и *Lycopodium*, 68 %. Среди пыльцы древесных видов отмечено одно пыльцевое зерно *Betula sect. Costatae*.

Среди пушицево-сфагнового болота расположены небольшие озера (озерки), вокруг которых находятся заросли кедрового стланика, ольховника, березы, рябины (*Sorbus sambucifolia*), жимолости голубой (*Lonicera caerulea*), в покрове – папоротники и плауны. Пробы, отобранные из верхнего слоя осадков озера (пробы 35, 38), содержат от 385 до 392 п.з. и спор. На долю пыльцы древесной растительности и кустарников приходится от 55 до 88 %, пыльцы *Pinus s/g Haploxyylon* – от 44 до 67 %, доля пыльцы *Duschekia* составляет от 3 до 51 %, максимум зафиксирован в озерных осадках. Незначительно количество пыльцы *Betula* и занесенной пыльцы пихты (*Abies*), ели (*Picea*), дуба (*Quercus*). Группа пыльцы травянистых видов включает пыльцу *Ericaceae* (до 91 %) и трав, типичных для болотной растительности, в том числе *Iridaceae* (2–14 %). Споры представлены *Polypodiaceae* (до 72 %) и *Lycopodium* (от 21 %). На болоте в поверхност-

ном слое торфа резко снижается количество пыльцевых зерен – до 198 (проба 40). Преобладает пыльца *Pinus s/g Haploxyylon* (59 %), увеличивается количество пыльцы берез (25 %), встречена аллохтонная пыльца *Abies*, *Quercus*. Среди пыльцы трав доминирует пыльца осок (*Cyperaceae*, 90 %), встречается пыльца *Rosaceae* (5 %), *Ericaceae* (3 %), единично *Cheporodiaceae*. Споры немногочисленны (6 %) – присутствуют *Polypodiaceae* и *Sphagnum*.

В почве под высокотравьем в тыловой части морской террасы около абразионно-денудационного уступа (проба 67) количество пыльцы и спор низкое (127 шт.), преобладает пыльца трав (55 %), представленная в основном *Asteraceae* (36 %), розоцветными (*Rosaceae*, 30 %), полынью (*Artemisia*, 14 %), что отвечает доминирующим в сообществе лабазнику камчатскому (*Filipendula camtschatica*), белокопытнику японскому (*Petasites japonicus*) и полыни, распространенной в растительных сообществах побережья. В группе пыльцы древесных и кустарников (32 %) присутствуют *Pinus s/g Haploxyylon* (70 %) и *Betula*. Споры немногочисленны (13 %), в основном *Polypodiaceae*.

В юго-западной части острова, в районе бухты Диана (рис. 1), были отобраны почвенные пробы под разнотравьем (проба 52) и шикшевником с многочисленными кустиками ольховника и ивы (проба 53). Пробы сильно различаются по количеству пыльцы и спор: в поверхностном слое луговой почвы (проба 52) содержится 550 шт. п.з. и спор, в почве под шикшевником (проба 53) – 2248 шт. В спорно-пыльцевых спектрах из луговой почвы в группе пыльцы древесных видов и кустарников доминирует пыльца *Pinus s/g Haploxyylon* (62 %); в палиноспектре из почвы под шикшевником до 28 % приходится на долю пыльцы ольховника и до 13 % – на пыльцу берез, по морфологии сходную с пыльцой кустарниковых берез. В небольшом количестве встречена пыльца ив (3 %) и заносная пыльца (*Abies*, *Picea*). Группа пыльцы травянистых видов в спектре из луговой почвы в основном состоит из пыльцы *Asteraceae* (до 84 %), единичны зерна пыльцы разнотравья. Пыльца трав и кустарничков в спектре из почвы под шикшевником состоит в основном из пыльцы *Ericaceae* (98 %),

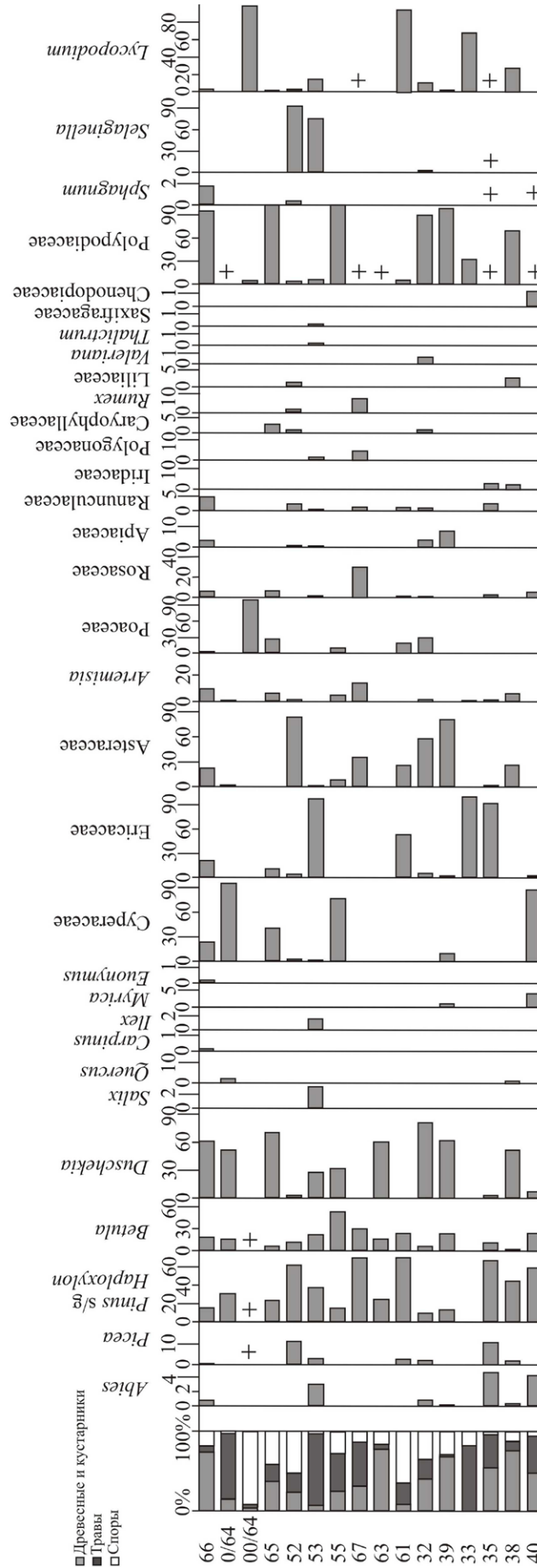


Рис. 2. Состав субфоссильных спорово-пыльцевых спектров из осадков и почв о. Кетой. Пробы: 66 – наилок ручья Каскадный, 0/64 – верхний слой осадков, небольшое озеро, 00/64 – пионерная почва на отложениях обвала, 65 – верхний слой осадков, небольшое озеро, 52 – почва под разнотравным лугом, 53 – почва под шикшевиком, 55 – поверхность торфяника, 67 – почва под высокоотравьем, 63 – наилок ручья Горчишный, 61 – пионерная почва, 32 – наилок временного водотока, 39 – наилок ручья Сточный, 33 – почва под шикшевиком, 35 – поверхность торфяника, 38 – поверхность торфяника, 40 – поверхность торфяника.

Fig. 2. Composition of subfossil pollen assemblages from the sediments and soils of Ketoi Island. Samples: 66, silt from Kaskadnyy Creek; 0/64, the sediments of small lake; 00/64, pioneer soil on rockfall deposits; 65, the sediments of small lake; 52, soil under forb meadow; 53, soil under crowberry (*Empetrum sibiricum*) communities; 55, peatland surface; 67, soil under tall grasses; 63, silt from Gorchichnyy Creek; 61, pioneer soil; 32, silt from temporary stream; 39, silt from Stochnyy Creek; 33, soil under crowberry (*Empetrum sibiricum*) communities; 35, peatland surface; 38, peatland surface; 40, peatland surface.

в небольшом количестве присутствует пыльца разнотравья. Встречена пыльца падуба, источником является *Plex rugosa*, характерный для каменноберезняков и зарослей кедрового стланика. Споры представлены в основном *Selaginella selaginoides* (от 74 % до 93 %), остальная часть приходится на *Polypodiaceae* и *Lycopodium*.

В этой же части острова на небольшом болоте, расположенном в нижней части склона на борту долины, получены спектры из моховой подстилки на поверхности торфяника (проба 55). Окружающая растительность – луговая, с небольшими куртинами ольховника и кедрового стланика, на прилегающих участках плато присутствует березовый лес. Палиноспектр содержит 261 шт. п.з. и спор. Основная доля приходится на пыльцу травянистых (47 %) и споры (до 28 %). Среди пыльцы древесных видов отмечена пыльца *Betula sect. Costatae* (46 %), *Duschekia* (32 %) и *Pinus s/g Haploxyylon* (15 %). Пыльца травянистых растений представлена *Сyperaceae* (до 76 %), *Роасеае* (11 %) и пыльцой разнотравья. Встречены только споры *Polypodiaceae*.

В западной части острова изучен состав палиноспектра из пионерной почвы (проба 61) на отложениях обвала, образованных крупными глыбами с бурой супесью в заполнителе. Почва (мощность 4–5 см) сложена плохо гумусированной супесью, формируется под разнотравной луговой растительностью. Общее количество пыльцы и спор составляет 1291 шт., преобладают споры (840), на долю древесных пород и кустарников приходится 111 п.з., трав – 340 п.з. В группе травянистых преобладают *Ericaceae* (53 %), *Asteraceae* (26 %) и *Роасеае* (19 %). Споры представлены в основном *Lycopodium clavatum* (95 %). Среди пыльцы древесных пород и кустарников встречается пыльца *Pinus s/g Haploxyylon* (70 %), *Betula* (19 %), единично *Picea*. Здесь же был изучен спектр из наилка ручья Горчиный (проба 63), в долине которого находится много фумарол. Наилкок содержит небольшое количество пыльцы, представленной главным образом *Duschekia* (61 %), *Pinus s/g Haploxyylon* (24 %) и *Betula* (15 %). Пыльцевые зерна трав единичны, споры представлены *Polypodiaceae*.

В северной части острова, около мыса Сторожева, пробы отбирались из верхнего слоя осадков мелких озер, образовавшихся на отложениях крупного обвала (пробы 0/64, 00/64, 65). Вокруг этих озерков – луговая растительность. Количество пыльцы и спор в спектрах от 341 до 350 шт. Среди древесных видов преобладает пыльца *Duschekia* (52–71 %) и *Pinus s/g Haploxyylon* (24–31 %), встречается пыльца *Betula* (6–16 %) и заносная пыльца *Quercus*. В группе травянистых и кустарничков основная часть приходится на пыльцу *Сyperaceae* (до 99 %), *Роасеае* (до 27 %) и *Ericaceae* (до 11 %). Споры представлены в основном *Polypodiaceae*. Здесь же на берегу озера в поверхностном слое почвы (проба 00/64) обнаружено 528 шт. п.з. и спор. Количество спор достигает 93 %, преобладает *Lycopodium*, в основном *L. clavatum*.

Спектр из наилка ручья Каскадный (проба 66), стекающего с отрога влк. Палласа, содержит значительное количество пыльцы и спор (916). На долю древесных пород и кустарников приходится 75 % пыльцы, в составе которой *Duschekia* (61 %), *Pinus s/g Haploxyylon* (15 %), *Betula sect. Costatae* (14 %) и единичные зерна аллохтонной пыльцы *Abies*, *Picea*, *Carpinus*, *Euonymus*. Пыльца травянистых растений и кустарничков почти в равных долях включает *Сyperaceae*, *Asteraceae* и *Ericaceae* (24, 23, 21 % соответственно). Обнаружены споры *Polypodiaceae* (95 %), *Lycopodium* и *Sphagnum*.

Обсуждение

В группе древесных преобладает пыльца кедрового стланика (до 70 %), ольховника (до 81 %), особенно в наилках ручьев, и березы (до 27 %), что отвечает распространению на острове стланиковых группировок на всех элементах рельефа и участках, занятых березовыми лесами и редколесьями, предпочитающими нижние части склонов и защищенные от ветра места. Каменная береза здесь основной лесообразующий вид, северная граница ее ареала находится немного севернее – на о. Расшуа. Несмотря на небольшой размер острова, ландшафтная структура организована довольно сложно, что обусловлено длительной и сложной историей вулканизма района,

приуроченностью биотопов к разным элементам рельефа, а также микроклиматическими особенностями [1]. Пропорции содержания пыльцы древесных пород значительно варьируют, что отражает хорошую дифференциацию природно-территориальных комплексов. Пыльца тиса остроконечного, который растет на острове, не найдена. Этот вид обычно продуцирует небольшое количество пыльцы. На острове он редко встречается и сильно угнетен. Пыльца рябины плохо сохраняется, возможно, включена в группу пыльцы Rosaceae. Количество пыльцы трав резко увеличивается на открытых пространствах – в пробах, отобранных из почв под шикшевниками, высокотравьем, в верхнем слое осадков некоторых озерков. Преобладает пыльца следующих семейств: Ericaceae, Asteraceae, Cyperaceae, Poaceae.

Можно отметить, что в торфяниках и почвах отчетливее фиксируются особенности локальных биоценозов. Спектры, полученные из поверхностного слоя почв в юго-западной части о. Кетой (бухта Дианы), в целом хорошо отражают растительность, под которой они

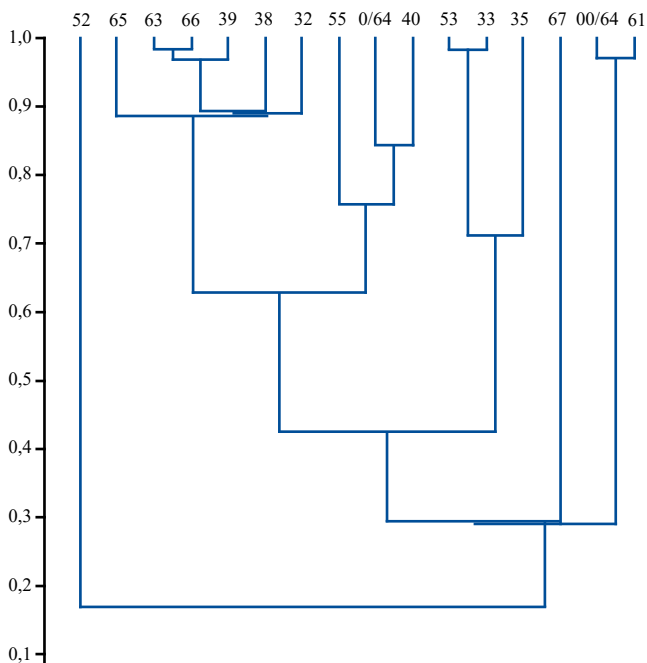


Рис. 3. Дендрограмма сходства субфоссильных спорово-пыльцевых спектров о. Кетой (средние Курильские острова). Номера точек отбора – см. рис. 2.

Fig. 3. Tree diagram of the similarity of subfossil pollen assemblages from Ketoi Island (Central Kuril Islands). Numbers of sampling sites are shown in Fig. 2.

были сформированы (шикшевник, ольховник, с отдельными куртинами кедрового стланика и развитием в покрове разнотравья). Спектры проб из почв под шикшевниками с небольшим участием карликовой ивы и папоротников в южной части острова образованы преимущественно пыльцой Ericaceae. Для спектров проб, отобранных из пионерных почв, которые начали формироваться на отложениях обвала в западной части острова, характерны в основном споры *Lycopodium clavatum* и пыльца разнотравья, что хорошо отражает локальную пионерную растительность. На дендрограмме (рис. 3) они выделяются в отдельную группу.

Спорово-пыльцевые спектры из поверхностного слоя торфа на заболоченных участках в целом также хорошо отражают локальную растительность. В них в группе пыльцы трав и кустарничков отмечается преобладание пыльцы представителей семейств Ericaceae, Asteraceae, а также в значительных количествах присутствует пыльца осок, злаков и незначительное количество пыльцы Iridaceae и других влаголюбивых растений. Пыльцевые спектры с преобладанием пыльцы разнотравья характерны для участков, занятых лугово-разнотравной растительностью. Спектры из аллювиальных наилок с преобладанием пыльцы ольховника, кедрового стланика и каменной березы хорошо отражают растительность прилегающих бортов долин ручьев. Разнотравье представлено пыльцой сложноцветных, злаковых и др., много спор папоротников. Палиноспектры из верхнего слоя осадков небольших озер с берегами, поросшими кедровым стлаником, ольховником, березой и разнотравьем, также очень хорошо отражают окружающую растительность, как древесную, так и травянистую.

Кластерный анализ выявил закономерности формирования субфоссильных спектров в зависимости от генезиса (рис. 3). В отдельную группу попадают палиноспектры из наилок ручьев и временного водотока, отмечено некоторое сходство с ними палиноспектров, полученных из поверхностного слоя торфяников и верхнего слоя осадков небольших озер с заболоченными берегами. Отдельные группы

составляют почвы, образованные под шикшевениками, и пионерные почвы. Наименьшее сходство с другими пробами имеет палиноспектр из поверхностного слоя почвы под разнотравным лугом и высокотравьем.

В незначительных количествах в субфоссильных спектрах о. Кетой присутствует аллохтонная пыльца широколиственных (*Quercus*, *Carpinus*), темнохвойных (*Abies*, *Picea*) пород и бересклета (*Euonymus*), занесенная ветровыми потоками, по-видимому, с Южных Курил и Японских островов. Содержание такой пыльцы, как правило, меньше 1–2 %, но в отдельных случаях (озерные отложения, поверхностный слой почв) доля темнохвойных достигает 10–15 %, что следует учитывать при реконструкции палеоландшафтов. Ближайшие места произрастания темнохвойных и широколиственных (*Quercus*) пород расположены на о. Итуруп. Аллохтонная пыльца найдена в субфоссильных пробах и на Южных Курилах [12, 13, 20], а на небольших безлесных островах на юге Малой Курильской гряды она образует всю древесную часть спектра [14]. Присутствие ее в разрезах голоценовых отложений является индикатором интенсивности циклогенеза в начале вегетационного периода [21]. Аллохтонная пыльца темнохвойных (*Picea* – до 15 %, *Abies* – до 2.6 %) и широколиственных (*Quercus*, *Ulmus*, *Corylus*, *Fagus*, *Juglans*) пород найдена и при изучении разреза средне-верхнеголоценового торфяника на юге о. Кетой [5]. Данные по субфоссильным спектрам показывают, что в современных условиях происходит активный занос пыльцы с южных островов и в отдельных пробах из озерных осадков и почв содержание аллохтонной пыльцы достаточно высокое.

Заключение

Состав субфоссильных палиноспектров из разнофациальных осадков о. Кетой хорошо согласуется с островной растительностью и отражает особенности биотопов, расположенных близко к местам отбора проб. Установлено, что на небольшой островной территории состав палиноспектров хорошо отражает дифференциацию ландшафтов, во многом обусловленную микроклиматической измен-

чивостью и особенностями развития локальной растительности на разных формах рельефа. Обнаружена пыльца темнохвойных и широколиственных древесных пород, занесенная ветровыми потоками с южной части Курил и Японских островов, но ее количество, за исключением отдельных проб из озерных осадков и почв, незначительное. Полученные данные по особенностям формирования спектров могут применяться при палеогеографических реконструкциях.

Список литературы

1. Ганзей К.С. 2010. *Ландшафты и физико-географическое районирование Курильских островов*. Владивосток: Дальнаука, 214 с.
2. Разжигаетва Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Арсланов Х.А., Копотева Т.А., Рыбин А.В. 2012. Развитие озерно-болотных обстановок древней кальдеры о. Расшуа (Центральные Курилы) в голоцене. *Тихоокеанская геология*, 31(4): 74–86. EDN: PGRDLH
3. Разжигаетва Н.Г., Ганзей Л.А., Белянина Н.И., Гребенникова Т.А., Арсланов Х.А., Пшеничникова Н.Ф., Рыбин А.В. 2013. Роль климатического и вулканогенного факторов в развитии ландшафтов о. Симушир (Центральные Курилы) в среднем-позднем голоцене. *Тихоокеанская геология*, 32(3): 55–67. EDN: QIXIBD
4. Разжигаетва Н.Г., Ганзей Л.А., Арсланов Х.А., Мохова Л.М., Дегтерев А.В., Ганзей К.С., Пшеничникова Н.Ф., Максимов Ф.Е., Старикова А.А., Петров А.Ю. 2018. Запись палеогеографических событий позднеледниковья–голоцена в органических отложениях острова Матуа (Центральные Курилы). *Тихоокеанская геология*, 37(5):48–64. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2018-37-5-48-64>
5. Разжигаетва Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Копотева Т.А., Рыбин А.В., Харламов А.А. 2009. Торфяник о. Кетой – опорный разрез среднего–позднего голоцена Центральных Курил. *Тихоокеанская геология*, 28(6): 65–80. EDN: KXXGMK
6. Новенко Е.Ю., Мазей Н.Г., Зерницкая В.П. 2017. Рецентные спорово-пыльцевые спектры заповедных территорий европейской части России как ключ к интерпретации результатов палеоэкологических исследований. *Nature Conservation Research. Заповедная наука*, 2(2): 55–65. <https://doi.org/10.24189/ncr.2017.012>; EDN: VZQNVK
7. Рашке Е., Савельева Л.А. 2017. Субрецентные спорово-пыльцевые спектры и современная раститель-

- ность дельты Лены. *Сибирский экологический журнал*, 4: 456–472. DOI: 10.15372/SEJ20170407
8. Руденко О. В., Васильчук А. К., Енина В. В., 2017. Сравнительная характеристика состава субрецентных палиноспектров в донных осадках моря Лаптевых и ледовых комплексах Сибирской Арктики. *Арктика и Антарктика*, 3: 1–16. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.3.24524; EDN: ZOVYQJ
 9. Короткий А.М. 2002. *Географические аспекты формирования субфоссильных спорово-пыльцевых комплексов (юг Дальнего Востока)*. Владивосток: Дальнаука, 271 с.
 10. Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. 2009. *Субфоссильные спорово-пыльцевые комплексы Сахалина и прилегающих территорий*. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 162 с.
 11. Мохова Л.М., Кудрявцева Е.П. 2022. Субфоссильные спорово-пыльцевые спектры как отражение высотной поясности Южного Сихотэ-Алиня. *Геосистемы переходных зон*, 6(1): 43–53. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.1.043-053>
 12. Anderson A.P., Lozhkin A.V. 2017. Modern pollen rain from lake sediments of the Kurile Islands. *Bull. of North Eastern Scientific Centre FEB RAS*, 1: 3–13. EDN: YTPBGY
 13. Мохова Л.М., Еременко Н.А. 2020. Состав спорово-пыльцевого дождя на острове Кунашир (Курильские острова). *Биота и среда заповедных территорий*, 2: 3–37. <https://doi.org/10.25808/26186764.2020.15.81.001>; EDN: XLMZSH
 14. Мохова Л.М. 2021. Субфоссильные спорово-пыльцевые спектры как отражение ландшафтного разнообразия островов Малой Курильской гряды. *Биота и среда заповедных территорий*, 1: 3–30. https://doi.org/10.37102/2782-1978_2021_1_1; EDN: ННИКЕМ
 15. Горшков Г.С. 1967. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 288 с.
 16. Воробьев Д.П. 1963. *Растительность Курильских островов*. М.: Изд-во АН СССР, 92 с.
 17. Баркалов В.Ю. 2002. Очерк растительности. В кн.: *Растительный и животный мир Курильских островов (Материалы Международного Курильского проекта)*. Владивосток: Дальнаука, с. 35–66.
 18. Баркалов В.Ю. 2009. *Флора Курильских островов*. Владивосток: Дальнаука, 468 с.
 19. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1): 1–9. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
 20. Korotky A.M., Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Mokhova L.M., Bazarova V.B., Sulerzhitsky K.A., Lutaenko K.A. 2000. Middle- and late-Holocene environments and vegetation history of Kunashir Island, Kurile Islands, northwestern Pacific. *The Holocene*, (10)3: 311–331. <https://doi.org/10.1191/095968300667552216>
 21. Разжигаяева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Дегтерев А.В., Ежкин А.К., Рыбин А.В., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Петров А.Ю. 2022. Запись изменений природной среды в озерно-болотных отложениях горной части острова Итуруп с позднеледниковья. *Тихоокеанская геология*, 41(2): 59–74. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2022-41-2-59-74>; EDN: QXSCAK

References

1. Ganzey K.S. 2010. [*Landscapes and physiographic regions of the Kuril Islands*]. Vladivostok: Dalnauka. 214 p. (In Russ.).
2. Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Arslanov Kh.A., Kopoteva T.A., Rybin A.V. 2012. Development of lacustrine-boggy sedimentary environments in the ancient Rasshua Island caldera (Central Kuril Islands) in the Holocene. *Russian Journal of Pacific Geology*, 6(4): 326–338. <https://doi.org/10.1134/S1819714012040069>; EDN: RGACUT
3. Razzhigaeva 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 Journal of Pacific Geology*, 7(3): 199–211. <https://doi.org/10.1134/S1819714013030068>
4. Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Arslanov Kh.A., Mokhova L.M., Degterev A.V., Ganzey K.S., Pshenichnikova N.F., Maksimov F.E., Starikova A.A., Petrov A.Yu. 2018. Record of Late Glacial–Holocene paleogeographical events in organogenic deposits of Matua Island (Central Kurils). *Russian Journal of Pacific Geology*, 12(5): 384–399. <http://dx.doi.org/10.1134/S181971401805010X>
5. Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Kopoteva T.A., Rybin A.V., Kharlamov A.A. 2009. The peat bog of Kettoi Island: The Middle-Upper Holocene reference section of the Central Kuriles. *Russian Journal of Pacific Geology*, 3(6): 570–584. <https://doi.org/10.1134/S1819714009060050>; EDN: MWZRVH
6. Novenko E.Yu., Mazei N.G., Zernitskaya V.P. 2017. Recent pollen assemblages from protected areas of European Russia as a key to interpreting the results of paleoecological studies. *Nature Conservation Research. Reserve science*, 2(2): 55–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.24189/ncr.2017.012>; EDN: VZQNVK

7. Raschke E.A., Savelieva L.A. **2017**. Subrecent spore-pollen spectra and modern vegetation from the Lena River delta, Russian Arctic. *Contemporary Problems of Ecology*, 10(4): 395–410. <https://doi.org/10.1134/s1995425517040084>
8. Rudenko O.V., Vasil'chuk A.K., Enina V.V. **2017**. [Comparative analysis of the composition of subrecent pollen spectra in the bottom sediments of the Laptev Sea and ice complexes of the Siberian Arctic]. *Arctic and Antarctic*, 3: 1–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.3.24524>; EDN: ZOVYQJ
9. Korotkii A.M. **2002**. [Geographical aspects of formation of subfossil spore-pollen complexes (Southern Far East)]. Vladivostok: Dal'nauka, 271 p. (In Russ.).
10. Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G. **2009**. [Subfossil spore-pollen complexes of Sakhalin and adjacent areas]. Vladivostok: Izd-vo Dal'nevost. universiteta, 162 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/np.379>
11. Mokhova L.M., Kudryavtseva E.P. **2022**. Subfossil pollen spectra as evidence of the altitudinal zonation of the Southern Sikhote-Alin. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 6(1): 43–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/grz.2022.6.1.043-053>
12. Anderson P.M., Lozhkin A.V. **2017**. Modern pollen rain from lake sediments of the Kurile Islands. *Bull. of North Eastern Scientific Centre FEB RAS*, 1: 3–13. EDN: YTPBGY
13. Mokhova L.M., Eremenko N.A. **2020**. Pollen rain composition on Kunashir Island (Kuril Islands). *Biodiversity and Environment of Protected Areas*, 2: 3–37 (In Russ.). <https://doi.org/10.25808/26186764.2020.15.81.001>; EDN: XLMZSH
14. Mokhova L.M. **2021**. Subfossil spore-pollen spectra as a reflection of the landscape diversity of the Lesser Kuril Ridge. *Biodiversity and Environment of Protected Areas*, 1: 3–30. (In Russ.). https://doi.org/10.37102/2782-1978_2021_1_1; EDN: HHIKEM
15. Gorshkov G.S. **1967**. [Volcanism of the Kuril Island Arc]. Moscow: Nauka, 287 p. (In Russ.). URL: http://repo.kscnet.ru/156/1/Gorshkov_1967.pdf (accessed 15.10.2023).
16. Vorob'ev D.P. **1963**. [Vegetation of the Kuril Islands]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 92 p. (In Russ.).
17. Barkalov V.Yu. **2002**. [Essay on vegetation]. In: [Flora and fauna of Kuril Islands (Materials of International Kuril Project)]. Vladivostok: Dalnauka, p. 35–66. (In Russ.)
18. Barkalov V.Yu. **2009**. *Flora of Kuril Islands*. Vladivostok: Dalnauka, 468 p. (In Russ.).
19. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. **2001**. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1): 1–9. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
20. Korotky A.M., Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Mokhova L.M., Bazarova V.B., Sul'erzhitsky K.A., Lutaenko K.A. 2000. Middle- and late-Holocene environments and vegetation history of Kunashir Island, Kurile Islands, northwestern Pacific. *The Holocene*, (10)3: 311–331. <https://doi.org/10.1191/095968300667552216>
21. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Degterev A.V., Ezhkin A.K., Rybin A.V., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu. **2022**. The records of environmental changes in lacustrine-swamp sequences within the mountain area of Iturup Island since the Late Glacial Period. *Russian Journal of Pacific Geology*, 16(2): 116–130. <https://doi.org/10.1134/S1819714022020087>

Об авторе

Мохова Людмила Михайловна (<https://orcid.org/0000-0003-0396-4756>), научный сотрудник, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, nadyar@tigdvo.ru

Поступила 21.03.2024

Принята к публикации 06.06.2024

About the Author

Mokhova, Lyudmila M. (<https://orcid.org/0000-0003-0396-4756>), Researcher, Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, nadyar@tigdvo.ru

Received 21 March 2024

Accepted 6 June 2024

КОНФЕРЕНЦИИ

V Всероссийская научная конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы» (Южно-Сахалинск, 2024 год)

V Всероссийская научная конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы», организованная Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), проходила с 27 по 31 мая 2024 года. Соорганизаторы конференции – Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Сахалинский государственный университет (СахГУ), МИП Питомник растений «Магнолия Парк».

В конференции приняли участие более 130 ученых, из них четверо приехали из Казахстана, Азербайджана и Китая. Было обсуждено более 150 докладов.

Российские специалисты были представлены исследователями из научных институтов, вузов и научно-производственных организаций Москвы, Санкт-Петербурга, Калининграда, Екатеринбурга, Иркутска, Казани, Новосибирска, Улан-Удэ, Барнаула, Апатит, Владивостока, Хабаровска, Петропавловска-Камчатского и Южно-Сахалинска.

Работа проходила по трем секциям:

- Исследования земли – ответ на вызовы природно-техногенных катастроф на территории Дальнего Востока и Восточной Сибири,
- Динамика моря, вопросы изменения климата,
- Живые системы и геологическая среда.

Секция «Исследования земли...» объединила взаимосвязанные тематики: геология и геодинамика Дальневосточного региона, вопросы сейсмологии и тектонофизики, вулканологии и вулканопасности, что позволило более широко обсудить работы. Укрупненная секция организована впервые.



Первый день работы конференции. Пленарное заседание.

Ученые, из которых 32 доктора и 65 кандидатов наук, специалисты, магистранты, аспиранты и студенты обсудили последние достижения в области геофизики, геологии, океанологии, геоморфологии, экологии, ботаники и смежных дисциплин в русле заявленной тематики конференции.

На открытии выступили с приветственным словом сопредседатель – д.ф.-м.н. Л.М. Богомолов, директор ИМГиГ ДВО РАН, и к.г.-м.н. Веселов О.В., старейший научный сотрудник института. Они отметили, что природные катастрофы представляют огромную опасность для жителей тех регионов, где они происходят, и поэтому важно изучение этих процессов, их возможное предупреждение и, следовательно, минимизация последствий.

На пленарной сессии темами докладов были: математическая модель изменений порового давления в скважине, вызванных прохождением телесеismicических волн; новые данные о строении зоны фазовых переходов верхней мантии в районе о. Сахалин; ретроспективный прогноз катастрофического землетрясения в Турции 6.02.2023 г.; унификация энергетических характеристик сейсмических событий Курило-Охотского региона; консолидационная модель подготовки сильных камчатских землетрясений, а также их оперативные предвестники; современные движения земной коры на вершине Авачинского вулкана и возможность отклика грязевых вулканов на далекие землетрясения; фокусировка волн цунами и последствия тайфуна Филлис на Сахалине в 1981 г.; особенности влияния передачи постоянного тока на окружающую среду.

В конце первого дня за «круглым столом» обсуждали развитие методов прогноза землетрясений и особенности проведения геофизического мониторинга в разных регионах России.

Во второй день конференции на двух секциях были рассмотрены такие вопросы, как модель очага, параметры среды землетрясений, реконструкции поля современных тектонических напряжений перед сильными землетрясениями, роль разрывных нарушений и снятие напряжений в очагах слабых и умеренных землетрясений, особенности границ Охотоморской плиты в районе Японских островов и Камчатки; вопросы геотермических и комплексных вулканологических исследований, проведенных в нашем институте. Отдельным блоком рассматривались проблемы мониторинга вулканических извержений на Курильских островах и Южно-Сахалинского грязевого вулкана.

Секция «Динамика моря, вопросы изменения климата» затронула проблемы расчета высоты и моделирования волн цунами, системы прогноза этих опасных природных явлений, геодинамические процессы в устьях рек, глобальные климатические изменения в голоцене на шельфе моря Лаптевых и изменение ионосферного климата над Восточной Сибирью и др. Отдельно секция обсуждала геолого-геоморфологические аспекты стратегии освоения ресурсов морских побережий Дальнего Востока, в том числе антропогенно-природные геоморфологические системы морских берегов и связанные с этой тематикой концепции устойчивости береговых геосистем и методы измерений.

Третий день работы конференции интересен разнообразной тематикой: итоги исследований нефти месторождений о. Сахалин и газонасыщенности осадочных пород части Карского моря; результаты сейсмоакустического профилирования структуры донных отложений нескольких озер в республике Хакасии; поиск предвестников и основ прогноза опасных геологических процессов в Байкальской рифтовой системе на основе комплексного мониторинга; результаты геофизического мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений на основе пространственно-временных изменений полного электронного содержания ионосферы. Отдельно были выделены вопросы исследований электротеллурического поля на территории института.

Секция «Живые системы и геологическая среда» начала свою работу с интереснейшего доклада о значении водных ресурсов, показанном Л.И. Мечниковым через положение о речных, морских и океанических цивилизациях. Так, в конце II – I тысячелетия до н.э. река Днестр выполняла роль границы между двумя крупными этнополитическими массивами и области формирования геополитических событий на западном фланге евразийских степей. Недаром археологические культуры начала железного века относятся к «речным»/«морским».

Далее были рассмотрены вопросы влияния палеоклиматических условий и ландшафтов на земноводных животных; перспективы для биоиндикации загрязнений на примере изучения жабр у рыб и адаптивные свойства обонятельной системы рыб к действию факторов внешней среды. Следующий блок вопросов относился к животным: обитание бурого медведя в прибрежно-морских ландшафтах

природного заказника «Восточный» в настоящее время и палеогеографическая реконструкция мелких млекопитающих плейстоцен-голоценового местонахождения Колобки (Западное Забайкалье); роль анаэробных микробных сообществ в биогеохимических циклах в подповерхностных горизонтах донных осадков Карского моря; факторы, определяющие состояние экосистем (на примере техногенного торфа в окрестностях г. Мончегорск Мурманской области и болотных вод в районе кобальто-медно-никелевого месторождения на Камчатке). Ряд докладов был посвящен адаптивным возможностям деревьев, формирующих в Северо-Восточной Азии растительные сообщества в условиях вулканического стресса, и проблемам восстановления зональных лесов, в том числе речь шла о выборе видов древесных растений, используемых в Сахалинской области для лесопосадок. Представлены были результаты большого блока исследований растительности Сахалина (эпифитные лишайники, инвазивные, редкие и охраняемые виды сосудистых растений) и западного Забайкалья (палеорастительность в позднем кайнозое).

По традиции были организованы выездные полевые геологические экскурсии, в этот раз в бухту Тихую и на Быковские пороги. Там ученые могли рассмотреть разрезы вулканогенной чеховской и туфогенно-кремнисто-терригенной невельской свит хребта Жданко бухты Тихой. Можно было подойти близко к огромным валунам и скалам высотой около 30 м, которые имеют в основном составе вулканические и осадочные породы и пополнить свою коллекцию образцами пород. А на Быковских порогах, состоящих из небольших каскадов, которые заканчиваются небольшим, но оглушающим водопадом, можно было увидеть и сами пороги, и постоять на огромной скале, которая раньше служила дамбой для водопада, а сейчас используется в качестве смотровой площадки.



Алевролиты со следами метаморфизма, которому подверглись породы чеховской свиты хребта Жданко.



Участники конференции после геологической экскурсии по берегу бухты Тихая вдоль хребта Жданко.

Конференция прошла в дружественной обстановке, участники нашли коллег из других городов для продолжения совместных исследований. По итогам конференции в результате обсуждения широкого спектра вопросов, связанных с опасностью природных катастроф в Дальневосточном и других регионах России, было отмечено, что получены новые научные результаты, позволяющие лучше понять основные закономерности природно-техногенных катастроф.



Фото на память: участники конференции у входа в Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН в последний день работы 31 мая 2024 г.

*Андреева Марина Юрьевна,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
ученый секретарь Оргкомитета конференции
(Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Южно-Сахалинск).
E-mail: andreeva-mu@mail.ru*

Фото И.П. Кремневой