

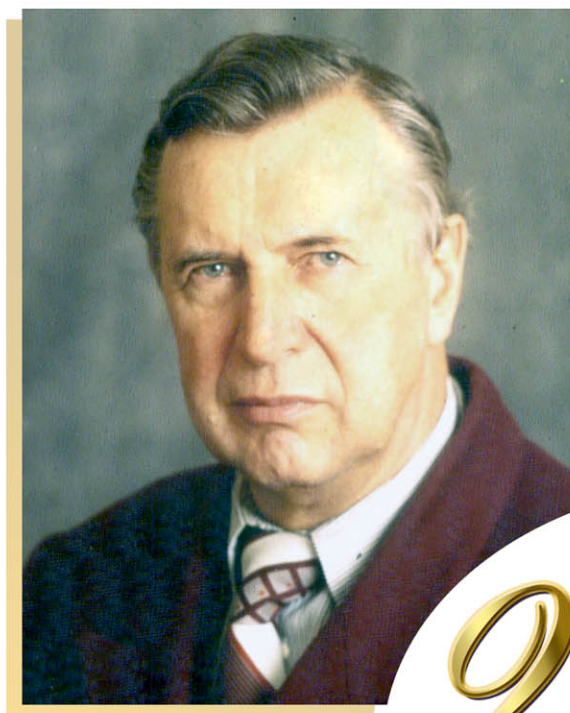
ISSN 2541-8912 (Print)
ISSN 2713-2161 (Online)

ГЕОСИСТЕМЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН

GEOSYSTEMS
of Transition Zones

2022 **Том 6** **№ 3**

*Члену редколлегии журнала
«Геосистемы переходных зон»
академику РАН Виталию Васильевичу Адушкину*



90
лет

Редколлегия журнала поздравляет академика РАН
Виталия Васильевича Адушкина
с замечательным юбилеем – 90-летием!

В.В. Адушкин принадлежит к той когорте ученых, которая своими трудами создала широкую известность Институту динамики геосфер РАН имени академика М.А. Садовского как передовой научной организации. Его глубокие, основанные на богатом фактическом материале исследования и теоретические разработки по физике и сейсмологии взрывов, геомеханике земной коры, физических полей в геосферах вошли в сокровищницу отечественной и мировой науки, стали эталоном для отечественных и зарубежных исследователей в науках о Земле.

Мы гордимся тем, что Виталий Васильевич является членом редколлегии нашего журнала. Вместе с его коллегами, благодарными учениками, соратниками приносим дань почтения и уважения многогранному и щедро реализуемому таланту ученого, педагога, мудрого и доброго человека.

Желаем дорогому юбиляру крепкого здоровья, новых идей и неугасающей энергии для их реализации, долгих лет, согретых теплотой и заботой близких.

Научный журнал

Учредитель и издатель:

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Издается с 2017 г.

Периодичность издания 4 раза в год

Scientific journal

Founder and Publisher:

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

Published since January 2017

Periodicity: Quarterly

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

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

Журнал:

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

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

The Journal is:

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

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

Адрес учредителя и издателя

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

Postal address

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

© ИМГиГ ДВО РАН, 2022

Редакционная коллегия*Главный редактор*

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

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

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

Editorial Board*Editor-in-Chief*

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Executive Secretary

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

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

Редакционная коллегия

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

Editorial Board

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

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

Переводчик **Качесова Галина Сергеевна**

Редактор к.ф.н. **Низяева Галина Филипповна**

Дизайн **Леоненкова Александра Викторовна**

Компьютерная верстка **Леоненкова Александра Викторовна,**

Филимонкина Анна Александровна

Корректор **Качесова Галина Сергеевна**

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

<http://www.imgg.ru>

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 16,9.

Тираж 150 экз. Заказ 7995. Свободная цена.

Подписано в печать 30.09.2022.

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

По вопросам распространения обращаться также

E-mail: gtrz-journal@mail.ru

Translator **Galina S. Kachesova**

Editor **Galina Ph. Nizyaeva**, Cand. Sci. (Phylology)

Design **Alexandra V. Leonenkova**

Desktop publishing **Alexandra V. Leonenkova,**

Anna A. Filimonkina

Proofreader **Galina S. Kachesova**

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

<http://www.imgg.ru>

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 16,9.

Number of copies 150. Order no. 7995. Free price.

Date of publishing 30.09.2022.

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

The Editorial Office can also be contacted by:

E-mail: gtrz-journal@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Геофизика. Сейсмология

ОБЗОР

Л.М. Богомолов, Н.А. Сычева. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы 145

Общая и региональная геология. Гидрогеохимия

О.А. Никитенко, В.В. Еришов, Р.В. Жарков, Г.В. Устюгов. Динамика физико-химических параметров термоминеральных вод Дагинского месторождения (до проведения реконструкции источников 2019–2020 гг.) 183

Вулканология

А.В. Дегтерев, М.В. Чибисова. Активность вулканов Курильских островов в 2020–2021 гг. 195

Геоморфология и палеогеография

М.С. Лящевская, Л.А. Ганзей. Динамика растительности юга Приморья при климатической ритмике малого ледникового периода 206

Ю.А. Микишин, А.О. Горбунов, И.Г. Гвоздева, М.В. Черепанова. Палеоклиматы, растительность и геохронология ландшафтно-климатических изменений на побережье юго-западной окраины Сахалина в среднем–позднем голоцене 218

Ф.А. Романюк, Д.Н. Козлов, Р.В. Жарков. Первые результаты полевых работ 2021 г. на группе Новиковских Карьерных озер (о. Сахалин): морфология и морфометрические параметры котловин 237

Океанология

Г.В. Шевченко, А.Т. Цой. Пространственная структура приливов у юго-западного побережья Камчатки по данным береговых наблюдений и спутниковой альтиметрии 246

Геоинформатика. Геоэкология

К.А. Швидская, А.В. Копанина. Крупномасштабное картографирование растительности Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающего ландшафта (о. Сахалин) по спутниковым данным 256

Экология

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

Ю.Н. Полтев, Т.Г. Коренева, В.Е. Марыжихин. Содержание микроэлементов в некоторых видах беспозвоночных из залива Терпения Охотского моря 277

Geophysics. Seismology

REVIEW

L.M. Bogomolov, N.A. Sycheva. Earthquake predictions in XXI century: prehistory and concepts, precursors and problems 145

General and regional geology. Hydrogeochemistry

O.A. Nikitenko, V.V. Ershov, R.V. Zharkov, G.V. Ustyugov. Dynamics of the physicochemical characteristics of the thermomineral waters of the Daginsky field (before the reconstruction of the springs in 2019–2020) 183

Volcanology

A.V. Degterev, M.V. Chibisova. Volcanic activity of the Kuril Islands in 2020–2021 195

Geomorphology and Palaeogeography

M.S. Lyashchevskaya, L.A. Ganzey. Dynamics of vegetation of the southern Primorye during the climatic rhythm of the Little Ice Age 206

Yu.A. Mikishin, A.O. Gorbunov, I.G. Gvozdeva, M.V. Cherepanova. Palaeoclimates, vegetation and geochronology of landscape-climatic evolution on the coast of the southwestern margin of Sakhalin in the Middle–Late Holocene 218

F.A. Romanyuk, D.N. Kozlov, R.V. Zharkov. First results of field work in 2021 on the group of Novikovskiye Karyernye lakes (Sakhalin Island): morphology and morphometric parameters of basins 237

Oceanology

G.V. Shevchenko, A.T. Tsoy. Spatial structure of the tides near the southwestern coast of Kamchatka according to coastal observations and satellite altimetry data 246

Geoinformatics. Geoecology

K.A. Shvidskaya, A.V. Kopanina. Large-scale mapping of the vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent landscape (Sakhalin Island) using satellite data 256

Ecology

SHORT REPORT

Yu.N. Poltev, T.G. Koreneva, V.E. Maryzhikhin. The content of trace elements in some invertebrate species from the Terpeniya Bay, the Sea of Okhotsk 277

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



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

ОБЗОР

УДК 550.34

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.3.145-164.164-182>
<https://www.elibrary.ru/nhwrtf>

Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы

Л. М. Богомолов^{*1}, Н. А. Сычева²

*E-mail: bleom@mail.ru

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

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

Реферат. В обзоре изложены отраженные в научной литературе наиболее важные результаты в области прогноза сильных землетрясений. Также представлены направления дальнейших исследований и теоретические модели, которые могут стать базовыми для совершенствования прогнозных методик и алгоритмов. Прослеживается переход от первоначальной (исторической) постановки проблемы сейсмического прогноза к современным подходам к этой проблеме, основанным на данных сейсмологического и геофизического мониторинга, а также наблюдений за состоянием атмосферы и ионосферы. Обсуждаются примеры успешных предсказаний землетрясений, которые могут свидетельствовать о потенциале некоторых подходов, по крайней мере для отдельных регионов (например, для Сахалина и Камчатки). Представляется, что прогнозы, успех которых обусловлен не случайным угадыванием, а использованием определенных алгоритмов или «работающих» предвестников, могут ослабить позиции пессимистов в дискуссии о принципиальной предсказуемости или непредсказуемости землетрясений.

Ключевые слова: землетрясение, методы предсказаний, прогноз среднесрочный, краткосрочный, предвестники геофизические, сейсмологические, модель очага, разлом

Earthquake predictions in XXI century: prehistory and concepts, precursors and problems

Leonid M. Bogomolov^{*1}, Nailia A. Sycheva²

*E-mail: bleom@mail.ru

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

²Shmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

Abstract. The review presents the most important results of investigations in the field of strong earthquake predictions, which were published in scientific sources. The ways of further studies of seismic prognosis problem are involved into consideration, as well as the based theoretical model, to improve predictive methods and algorithms. One can follow the research transformation from initial (historical) articulation of this intriguing problem to its current state of the art, including modern approaches based on the data of seismological and geophysical monitoring, and as well as ionospheric and atmospheric surveys. Examples of successful earthquake predictions have been discussed and treated from viewpoint of the potential of used methods, at least for some regions (for example, Sakhalin and Kamchatka). It is assumed that the predictions, which were realized due to certain algorithms and/or working precursors rather than random guessing, are able to weaken the pessimist side in the discussion: are earthquakes predictable or unpredictable in principle.

Keywords: earthquake, predictive methods, mid-term prediction, short-term prediction, geophysical, seismological precursors, source-site model, fault

Для цитирования: Богомолов Л.М., Сычева Н.А. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 3, с. 145–182. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.3.145-164.164-182>; <https://www.elibrary.ru/nhwrtf>

For citation: Bogomolov L.M., Sycheva N.A. Earthquake predictions in XXI century: prehistory and concepts, precursors and problems. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 145–182. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.3.145-164.164-182>; <https://www.elibrary.ru/nhwrtf>

Благодарности и финансирование

Авторы признательны коллегам В.Г. Быкову, А.С. Закупину, М.В. Родкину, А.И. Лутикову за обсуждение важных вопросов и ценные советы по работе. Выражаем благодарность Г.С. Качесовой за помощь в подготовке английской версии статьи.

Авторы посвящают этот обзор памяти Ивана Николаевича Тихонова.

Введение

Прогноз землетрясений длительное время понимался как предсказание района (места), времени и магнитуды (энергии) ожидаемого сейсмического события [Зубков, 2002]*. Прогноз места и силы землетрясения на длительный период (долгосрочный прогноз) в настоящее время ассоциируется, как правило, с сейсмическим районированием различной степени детальности: общим сейсмическим районированием (ОСР), детальным и микросейсмическим районированием. Общее сейсмическое районирование имеет практическое значение для проектирования зданий и сооружений в сейсмически опасных регионах. Действительно, карты ОСР можно интерпретировать как вероятностный прогноз на десятилетия, т.е. наиболее длительный период из рассматриваемых сейсмологами. Оценивается максимальная интенсивность сейсмических сотрясений (в баллах) [Общее сейсмическое... , 2016]. ОСР осуществляется на основании совокупности критериев и признаков: плотности землетрясений, их энергии и интенсивности, геологических и геофизических признаков, графиков повторяемости, максимальных значений магнитуд (M_{\max}), сотрясаемости, сейсмической активности и других макросейсмических данных [Друмя, 1985; Shebalin, 2006; Shebalin et al., 2004; и др.].

Развитие методов сейсмического районирования, проблемы практического его проведения создали предпосылки для разработки эффективных и экономически целесообразных средств сейсмостойкого строительства, т.е. различных способов и устройств вибрационного контроля, позволяющих уменьшить сейсмические нагрузки на здания и сооружения [Арутюнян, 2010; Torunbalci, 2004]. В сейсмостойком строительстве широко применяются принципы пассивного контроля (сейсмоизоляция

Acknowledgements and Funding

Authors are grateful to the colleagues Victor G. Bykov, Alexander S. Zakupin, Mikhail V. Rodkin, Alexander I. Lutikov for discussing the significant issues and valuable advices on the work. We also appreciate Galina S. Kachesova's help in preparing the English version of the article.

Authors dedicate this review to the memory of Ivan N. Tikhonov.

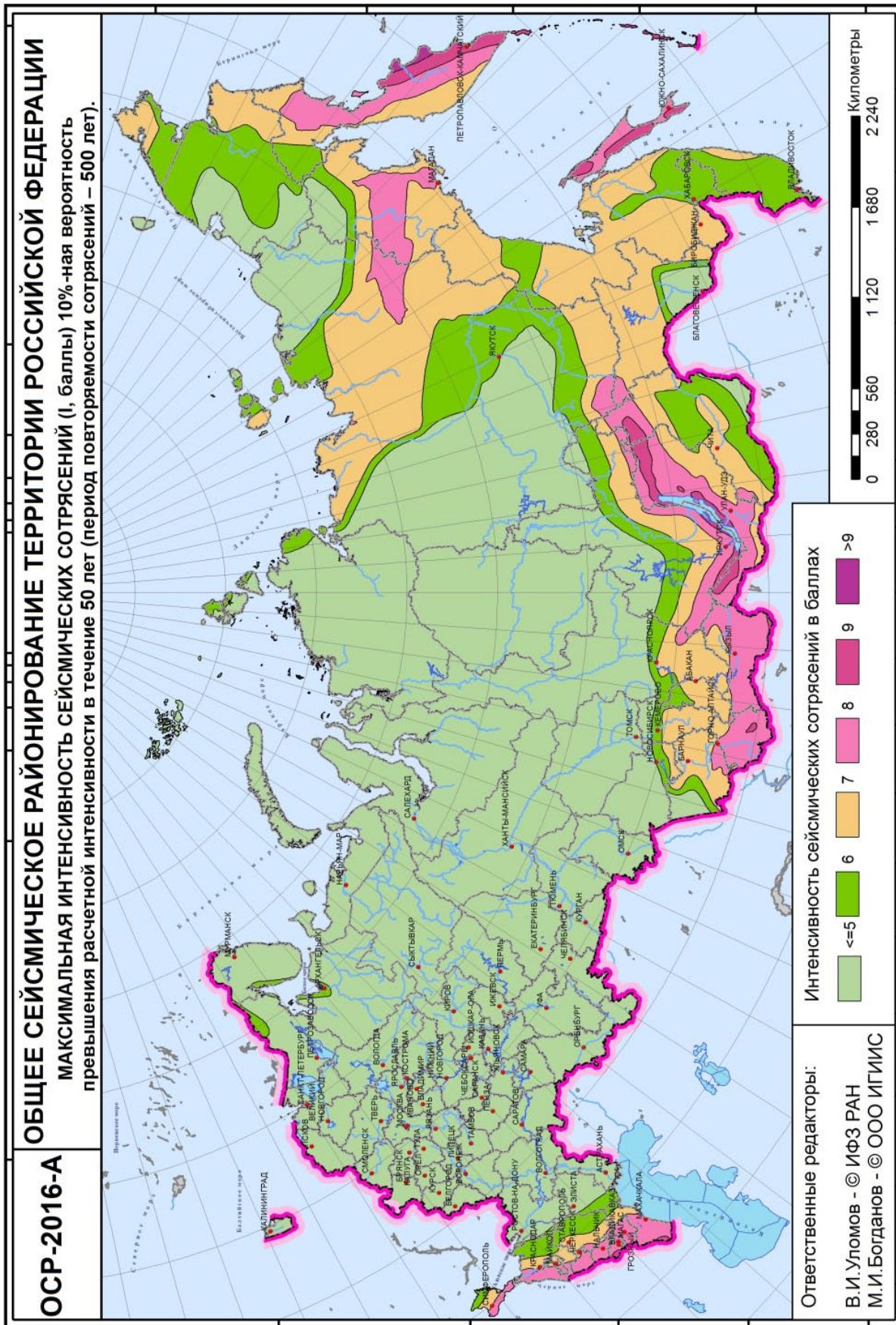
ция зданий от грунта). Для ответственных объектов отработаны также устройства активного контроля, включающие аппаратуру для записи колебаний грунта в режиме реального времени, силовые приводы, возбуждающие противофазные колебания конструкции, и систему управления.

После опубликования макетов карт ОСР-2012, которые должны были заменить карты ОСР-97, утвержденные руководством РАН и Госстроя России и принятые как нормативы сейсмостойкого строительства, в России развернулось их широкое обсуждение научной общественностью. В результате работ по совершенствованию и актуализации этих макетов были созданы карты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (включая после 2014 г. территорию Крыма), названные картами ОСР-2016 (см. карту на рисунке). Ответственные редакторы карт ОСР-2016 – профессор В.И. Уломов (Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН) и М.И. Богданов (генеральный директор ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве»).

При построении карт ОСР-2016 использовались различные модели сейсмического режима, в том числе вероятностная модель, с успехом примененная в ОСР-97. В окончательном варианте карт ОСР-2016 были учтены рекомендации расширенного заседания Научного совета РАН по проблемам сейсмологии, состоявшегося 24.10.2013 г.

Детальное сейсмическое районирование и микросейсмическое районирование принимают в расчет локальные инженерно-геологические условия (свойства грунтов, уровень грунтовых вод и др.) и определяют поправки к максимальной интенсивности сейсмических сотрясений по картам ОСР. При этом величина поправки в баллах, как правило, не превышает 0.5.

* Редакция сочла целесообразным для удобства читателей применить в обзоре способ ссылок на источники в форме указания фамилии автора и года опубликования работы.



Карта общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016-А: максимальная интенсивность сейсмических сотрясений (в баллах) с допуском 10%-й вероятности превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет (период повторяемости землетрясений 500 лет) [Общее сейсмическое..., 2016].

Прогноз времени сейсмического события выделился в самостоятельную проблему, связанную как с изучением предвестников землетрясений (феноменологические подходы), так и с разработкой адекватных моделей сейсмического очага.

Эта проблема остается одним из главных вызовов перед науками о Земле, а ее фундаментальность рельефно проявилась в дискуссии о принципиальной предсказуемости или непредсказуемости землетрясений, инициированной в 1990-е годы работами Р. Геллера [Geller, 1991, 1996, 1997; Geller et al., 1997]. В ходе дискуссии отмечено, что проблема прогноза содержит как научную, так и социально-экономическую составляющую [Snieder, van Eck, 1997]. Социальные и экономические аспекты со временем могут трансформироваться, что влияет на оценку прогнозов и их практическую значимость. Это, однако, не входит в задачи данного обзора. С точки зрения научной составляющей можно отметить, что критика выявления предвестников землетрясения базировалась в значительной степени на опыте наблюдений аномалий геофизических полей в Японии и Греции, в частности по геодезическим данным и электротеллурическим потенциалам (VAN метод) [Geller, 1996]. Однако выводы об отсутствии достоверных предвестников не могут переноситься автоматически на все ситуации, включая исследования в других регионах и применение новых методов. Сомнения в возможности прогноза землетрясений усугубились под влиянием известных положений нелинейной динамики систем (расходимость фазовых траекторий, неустойчивость при изменении начальных условий [Короновский, Наймарк, 2012; Короновский и др., 2019]) и концепции самоорганизованной критичности (иногда называемой третьим поколением синергетики [Малинецкий, Подлазов, 1997; Bak, Tang, 1989]). Применение этой концепции к анализу природных катастроф выделило такие непредсказуемые сценарии, как, например, модель sand pile («кучи песка») [Bak, Tang, 1989]. Однако гипотеза о соответствии потока сейсмических событий моделям самоорганизованной критичности не доказана. Зато известны примеры явного несоответствия реальной сейсмичности таким моделям (прецеденты удачных прогнозов землетрясений [Shebalin et al., 2004; Wang et al., 2006; Tikhonov, Rodkin, 2012]).

Предыстория: о прогнозе и предвестниках землетрясений

История исследований по проблеме прогноза времени возникновения землетрясений и предвестников в качестве научной задачи охватывает более полувека. Этот период, с одной стороны, характеризуется лавинообразным накоплением данных о предвестниках землетрясений, особенно в начальный период времени (1960–1970-е годы), с другой – весьма ограниченной возможностью их использования в реальном прогнозе.

Активный поиск и исследования предвестников землетрясений начались с крупных землетрясений в начале XX в., которые принесли гибель людям и целым городам. Среди самых страшных из них – землетрясение в Китае (16.12.1920, $M = 7.8$), унесшее жизни более 200 тыс. людей; в Японии (01.09.1923, $M = 8.3$), во время которого погибли более 100 тыс. человек; на территории Туркмении катастрофическое Ашхабадское землетрясение (06.10.1948, $M = 7.3$), полностью разрушившее город и лишившее жизни более 100 тыс. человек.

После этих разрушительных землетрясений во многих странах мира – в Японии, США, КНР, бывшем СССР – начались работы по организации прогнозных исследований. В бывшем СССР Ашхабадское землетрясение сделало проблему прогноза таких грозных природных явлений одной из актуальнейших в стране. Под руководством академика Г.А. Гамбурцева была развернута программа исследований по прогнозу землетрясений. Ему удалось создать настолько всеобъемлющую, глубоко продуманную и научно обоснованную программу, что и по сей день она не утратила своего значения как руководства к осуществлению практически значимого прогноза землетрясений [Левнев, 2015]. Основные представления Гамбурцева о состоянии и перспективах работ по этой проблеме были сформулированы в статье [Гамбурцев, 1957] и последующих его работах (см. [Левнев, 2015, 2016]).

Программа Гамбурцева базировалась на представлении, что в процессе своего развития земная кора расчленялась на относительно прочные блоки, разделенные ослабленными зонами – сейсмическими швами (разломами). Медленные относительные смещения этих блоков приводят к накоплению сдвига-

вых напряжений и их концентрации в определенных местах шва. Там, где напряжения превосходят предел прочности, возникают очаги землетрясений.

К первым достойным публикациям по данной проблеме, согласно [Зубков, 2002], можно отнести исследования предвестников по движению земной коры [Reid (ed.), 1910; Мещеряков, 1968; Такаги и др., 1984]; по извержениям вулканов [Такаги и др., 1984]; по уровню моря [Рикитакэ, 1979]; уровню подземных вод [Cable, 1965]; по атмосферному электричеству [Бончковский, 1954]; по геоакустической активности [Анциферов, 1969]; вариациям сейсмического режима [Мамадалиев, 1964; Кейлис-Борок, Малиновская, 1966; Кособоков, Ротвайн, 1977]; ориентации осей напряжений в очагах слабых землетрясений перед сильным землетрясением [Симбирева и др., 1974]; дебиту источников подземных вод [Смирнова, 1971]; предвестников геомагнитных [Kato, Utashiro, 1949]; импульсных электромагнитных [Воробьев и др., 1976; Гохберг и др., 1979]; метеорологических [Рикитакэ, 1979]; гравитационных [Fujii, 1966]; термических [Уломов, 1971; Милькис, 1986]; радоновых [Барсуков, 1970; Уломов, Мавашев, 1971]; электротеллурических [Соболев, Морозов, 1970].

Во второй половине XX – начале XXI в. состояние проблемы прогноза землетрясений обсуждалось в известных монографиях: «Предсказание землетрясений» [Рикитакэ, 1979; Моги, 1988], «Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии» [Такаги и др., 1984], «Предвестники землетрясений» [Сидорин, 1992; Зубков, 2002], «Основы прогноза землетрясений» [Соболев, 1993], «Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы, методика, реализация» [Завьялов, 2006], «Методы анализа каталогов землетрясений для целей средне- и краткосрочного прогнозов сильных сейсмических событий» [Тихонов, 2006].

Было получено множество результатов, однако среди них не удалось выявить аномалии – вариации, которые можно интерпретировать как однозначные признаки ожидаемого сильного землетрясения. Вариации геофизических и других полей – гипотетические предвестники – регистрировались на фоне шума, сопровождающего геодеформационный процесс [Зубков, 2002; Кособоков, 2005]. В таких условиях кроме вариаций, связанных с под-

готовкой очага землетрясения, отмечались вариации тех же полей и в асейсмичный период, условно называемые ложными тревогами. Это обстоятельство в ряде работ расценивалось как неудача прогноза [Друмя, 1985; Гуфельд и др., 2011].

Оно дало повод для скептического вывода, сформулированного в работе [Певнев, 2015], про ошибочность выбранной стратегии решения проблемы прогноза места готовящегося очага землетрясения. Это заключение относится к использованию в целях прогноза «методов решения обратных задач (распознавания образа) по разрозненным косвенным признакам – аномалиям в различных полях: сейсмических, деформационных, гидрогеологических, геохимических, электромагнитных и многих др.» [Певнев, 2015, с. 195]. Альтернативные методы, т.е. прямая задача обнаружения места и времени землетрясения по признакам, которые с необходимостью возникают при формировании очага, требуют развития адекватных геомеханических моделей. Но эта проблема, по-видимому, еще сложнее прогноза землетрясений, ее решение может затянуться на длительное время. Быстрое совершенствование методов решения обратных задач позволяет надеяться на продвижение в проблеме прогноза, а возможно, и на практически значимые результаты (хотя прогнозы будут оставаться вероятностными). Поэтому трудно согласиться с вышеизложенным заключением.

Произошедшие в конце прошлого века катастрофические землетрясения в Китае, Италии, Японии, Иране, США (в Калифорнии), в Турции и на территории бывшего СССР в Спитаке и Нефтегорске возобновили интерес к исследованию задачи прогноза землетрясений [Кособоков, 2005; Завьялов, 2006; Тихонов, 2006].

В США проблема прогноза землетрясений была поднята в середине 1960-х годов. Совместно с Японией было проведено множество конференций, но никаких серьезных результатов не последовало вплоть до создания в 1977 г. Национальной программы снижения опасности землетрясений (National Earthquake Hazards Reduction Program) [Scholz, 1997]. Одной из ее задач стала разработка методов прогноза землетрясений и систем раннего предупреждения.

В 1984 г. стартовал Паркфильдский эксперимент [Bakun et al., 2005], постановка которого опиралась на квазипериодичность возникновения землетрясений на данном участке разлома Сан-Андреас (Калифорния, США). Однако и этот эксперимент не позволил правильно спрогнозировать время очередного землетрясения [Roeloffs, Langbein, 1994]. В 1990 г. акценты были смещены с прогноза на смягчение ущерба [Mervis, 1990]. В 1995 г. Национальная академия наук провела коллоквиум «Прогноз землетрясений: вызов для науки», который не смог дать никакой новой информации для предсказаний [Кнопoff, 1996].

В Японии программа по предсказанию землетрясений началась в 1964 г. [Bormann, 2011] пятилетним планом [Rikitake, 1966]. В 1978 г. программа занялась прогнозом землетрясений с $M > 8$. Длительное время выполняются наблюдения за районом вблизи Токио, где 01.09.1923 произошло разрушительное землетрясение, $M = 8.3$. На этом небольшом участке вплоть до землетрясения в Кобе (17.01.1995, $M = 7.3$) были сосредоточены основные исследования японских сейсмологов. После 1994 г. в Японии было резко усилено финансирование сейсмологических исследований, создана одна из наиболее плотных сетей сейсмических и GPS-станций (расстояние между станциями 50–100 км). Данные этой сети были использованы [Tikhonov, Rodkin, 2012] для среднесрочного прогноза землетрясения Токачи-оки (26.09.2003, $M_w^* = 7.3$), который оправдался частично. В самой Японии не было сделано предсказаний этого землетрясения. В настоящее время основные усилия японских сейсмологов направлены на выявление на контактах плит участков с неоднородностями (asperities, дословно шероховатостями [Кочарян, 2016]), которые, по их мнению, являются потенциальным источником их «зацепления» и, следовательно, фактором, определяющим последующее накопление уровня напряжений.

В Китае после успешного прогноза землетрясения в окрестности г. Хайченг (04.02.1975, $M = 7.3$) произошло катастрофическое Таншаньское землетрясение (18.07.1976, $M = 7.3$), не проявившееся в ряде предвестников (форшоки и др.), за которыми осуществлялось слежение. Вслед за Японией и США в Китае наращиваются сети сейсмологических и геофизических

станций с целью изучения физических полей сейсмоактивных областей. После мощного землетрясения в китайской провинции Сычуань в 2013 г. было решено вложить в прогноз сейсмических ударов более 300 млн долл. для создания в наиболее опасных районах страны сети из 5000 станций наблюдения, цель которых – раннее предупреждение о сильном землетрясении (<https://www.epochtimes.ru/kitaj-sozdast-sistemu-ekstrennogoopoveshheniyao-zemletryasenyah-99035049/#/>).

В России в 90-х годах прошлого столетия после распада СССР и фактического прекращения финансирования научных исследований были существенно свернуты комплексные исследования сейсмоактивных областей (утрачены не только геофизические полигоны в Гарме и Талгаре, но и, частично, собранные данные). Это предопределило угасание интереса к проблеме изучения процесса деформирования, происходящего в области будущего очага землетрясения. Основной упор в прогнозе землетрясений стал делаться на поиск в основном косвенных геофизических предвестников и статистический анализ закономерностей сейсмического режима [Соболев, Морозов, 1970; Kossobokov et al., 1990; Соболев, 2003; Рогожин и др., 2011; Sobolev et al., 1991]. Отыскиваются либо области сейсмического затишья [Ружич, 1996], либо, наоборот, области повышенной концентрации сейсмичности [Завьялов, 1986].

Классификация прогнозов и предвестников землетрясений

Накопленный огромный материал по предвестникам землетрясений в определенной степени систематизирован, и в настоящее время существует несколько классификаций предвестников. В 2011 г. Е.А. Рогожин на конференции «Прогноз землетрясений: готова ли к ним Россия и мир?» заявил, что слабой стороной изучения предвестников является то, что нет никакой специальной службы в нашей стране, которая вела бы комплексное наблюдение за всеми предвестниками. В этих условиях все имеющиеся классификации предвестников, как и видов прогноза, несколько условны.

В зависимости от времени проявления предвестника относительно момента землетрясения прогнозы разделяются на долго-

* Обозначения магнитуд в обзоре соответствуют обозначениям их в источниках.

срочные, среднесрочные и краткосрочные. Следует отметить, что на практике подобное разделение достаточно условно, особенно это относится к краткосрочным и среднесрочным предвестникам.

Долгосрочный прогноз основывается на особенностях геодинамических процессов в регионе, проявляющихся как изменения напряженно-деформированного состояния земной коры и связанные с этим изменения сейсмического режима (такие как появление зон сейсмического затишья, вариации скоростей проходящих сейсмических волн). Долгосрочным признаком подготовки очага землетрясения также может быть консолидация блоков земной коры и сопутствующее увеличение радиуса корреляций сейсмических событий. Как было упомянуто, функцию долгосрочного прогноза места и силы землетрясения фактически выполняет сейсмическое районирование.

Среднесрочный прогноз дает возможность получить предупреждение о сейсмическом событии от нескольких недель или месяцев до нескольких лет. Этот прогностический уровень предполагает сценарий развития процесса разрушения по данным сейсмологического мониторинга, а также текущих наблюдений за геофизическими полями, изменениями наклонов земной поверхности, режимных наблюдений над дебитом и химическим составом водных источников и глубоких водяных, нефтяных и газовых скважин. Используются формализованные критерии оценки статистической значимости каждого из возможных предвестников и их комплекса.

Теоретической основой представлений о среднесрочных предвестниках являются модели, описывающие существенное увеличение неупругой деформации (в частности, дилатансии, т.е. возрастания объема при деформации сдвига) по месту будущего очага и в окружающей его зоне. Наиболее известные модели: скачкообразного скольжения блоков (stick-slip), лавинно-неустойчивого трещинообразования и дилатантно-диффузионная модель [Соболев, 1993; Scholz, 2002]. Взаимосвязь между размерами очага и расстоянием, на котором могут появиться предвестники, проанализирована в обобщении [Добровольский, 1991]. В этой работе была предложена консолидационная модель очага и на ее основе получены количественные оценки упомянутых расстояний. Для времени ожидаемого со-

бытия подобных оценок не получено. В этой ситуации устанавливаются феноменологические связи между параметрами предвестников и землетрясениями, которые в дальнейшем используются для оценки места и магнитуды ожидаемого землетрясения [Друмя, 1985; Моргунов, 1999; Tikhonov, Rodkin, 2012]. Но время события прогнозируется в течение характерного интервала длительностью до нескольких лет. Среднесрочные прогнозы открывают возможность для уточнения оценок времени события, т.е. для многоэтапного прогноза на основе дополнительных данных для выделенного «тревожного» региона (см. ниже).

Краткосрочный прогноз – прогноз с заблаговременностью от нескольких суток до нескольких недель до события. Считается, что при этом могут сохранять силу вышеописанные методы [Друмя, 1985; Моргунов, 1999]. Вместе с тем особо значимыми становятся активизации процесса изменения напряженно-деформированного состояния (в частности, форшоковые серии). Различные краткосрочные предвестники: сейсмологические, электромагнитные, гидрогеохимические и др. (в зависимости от метода наблюдений, см. ниже) опираются на специализированные физические модели, общая модель их возникновения вряд ли может быть разработана. Так, например, широко распространенная модель сейсмoeлектрических взаимосвязей [Hayakawa, Molchanov (eds), 2002] объясняет возбуждение электромагнитного поля перед землетрясением разделением зарядов на контактной поверхности, вдоль которой произойдет сейсмическая подвижка.

Именно краткосрочный прогноз оказался в фокусе дискуссии о возможности или невозможности предсказания землетрясений по наблюдаемым предвестникам [Соболев, 1993]. Аргументация о практической невозможности краткосрочных прогнозов была представлена в работах [Короновский, Наймарк, 2012; Короновский и др., 2019; Geller, 1997; Geller et al., 1997; Gufeld et al., 2011; Snieder, van Eck, 1997]. Но также известны и работы с обнадеживающими результатами о краткосрочных прогнозах [Моргунов, 1999; Гаврилов, 2007; Щекотов и др., 2015; Тихонов и др., 2017; Hayakawa et al., 1996; Rozhnoi et al., 2009].

Сверхкраткосрочный (оперативный) прогноз с временем опережения от нескольких секунд до нескольких часов рассматривается

в некоторых работах как предельный случай краткосрочного прогноза [Паровишный и др., 2015]. Фактически, подходы к оперативному прогнозу решают ту же задачу, что и методы раннего обнаружения подвижек в сейсмическом очаге. Сверхкраткосрочные прогнозы актуальны в связи с выводами нелинейной динамики о наличии «горизонта прогнозов», за которым детерминированное описание поведения сложных динамических систем невозможно [Малинецкий, Подлазов, 1997]. Для зон очагов землетрясений за горизонтом предсказуемости могут оказаться периоды ожидания события длительностью порядка недели, как у краткосрочных прогнозов [Короновский, Наймарк, 2012]. При этом среднесрочные прогнозы отражают не само приближение разрыва, но сопутствующие синхронные процессы.

Методы, на основе которых происходит изучение предвестников землетрясений, обычно подразделяют на геологические, геофизические, гидрогеохимические, биологические, геомеханические, сейсмологические и биофизические.

Геологическими методами изучают разломы и трещиноватость пород как один из факторов, который определяет возможное место будущего землетрясения.

Геофизическими методами оценивается плотность, электропроводность, магнитная восприимчивость, скорости продольных и поперечных волн, изменение напряженности электротеллурического и геомагнитного полей и т.д. Особая группа геофизических методов – ионосферные [Бучаченко и др., 1996; Molchanov, Hayakawa, 2007], которыми в период перед землетрясениями анализируются изменение полного электронного содержания, изменение параметров проходящих радиоволн и другие вариации.

Гидрогеохимические методы основаны на измерении содержания химических элементов в грунтовых и скважинных водах. Определяется содержание радона, гелия, фтора, кремнистой кислоты и других элементов. Их концентрации могут служить наиболее характерными предвестниками предстоящих землетрясений.

Геомеханические предвестники связаны с деформацией горных пород, движением блоков и мегаблоков в сейсмоактивных регионах.

К *сейсмологическим* методам выявления предвестников можно отнести определение

отношения скоростей продольных и поперечных волн, отношения амплитуд различных типов волн, определение коэффициентов поглощения и рассеивания, вычисление частоты проявления микроземлетрясений, выделение зон временной активности и затишья. В эту же группу предвестников естественно относить и более сложные параметры, которые рассчитываются по сейсмологическим данным: параметр сейсмогенных разрывов $K_{ср}$ [Завьялов, 2006], характеристики корреляций с фазами лунно-солнечных приливов [Салтыков, 2016], параметры упорядоченности низкочастотного сейсмического шума [Любушин, 2011] и др.

Биологические и биофизические предвестники связывают с проявлениями необычного поведения животных, которое, предположительно, вызвано изменениями геофизических полей. Эти предвестники предполагают изменения в биосфере (в частности, в поведении некоторых объектов) при аномалиях геофизических полей Земли перед землетрясением. Примером таких аномалий могут служить характеристики естественного электрического поля в атмосфере. Вопрос о достоверности для биофизических (биологических) предвестников еще более спорный, чем для других.

Сейсмологические параметры по степени значимости образуют следующий ряд:

- Параметр, определяемый по пересечению осей сжатия в очагах заглубленных форшоков и указывающий на место очага готовящегося землетрясения [Захарова, Рогожин, 2000, 2001, 2004];
- Параметр, характеризующий напряженное состояние среды по определению тензора сейсмического момента (Centroid Moment Tensor) [Юнга, 1996, 1999];
- RTL-параметр, основанный на выделении аномалии сейсмического затишья по трем характеризующим сейсмический режим функциям: эпицентральной R , временной T и энергетической L [Соболев, Тюпкин, 1996, 1998];
- Параметры потока сейсмических событий, используемые в алгоритмах «Магнитуда 8» (M8) и «Сценарий Мендосино» (MSc) [Kossobokov et al., 1990];
- Параметр S для форшоковой активизации [Соболев, 1993, 1999].

Используя комплекс наиболее достоверных долгосрочных, среднесрочных и кратко-

срочных сейсмологических предвестников, можно на практике осуществлять мониторинг потенциальных очаговых зон и оценивать оперативную обстановку, выявлять периоды повышенной вероятности землетрясений.

«Работоспособность» геофизических предвестников доказана на примере успешного предсказания Кроноцкого землетрясения 05.12.1997, $M_w = 7.8$ [Завьялов, 2006]. Это землетрясение произошло в Камчатской области, хорошо обеспеченной системами геофизических и геохимических наблюдений за прогнозными признаками.

В работе [Любушин, 2011] дана среднесрочная оценка сейсмической опасности для большей части территории Японии по параметрам микросейсмического шума (возбужденного за счет разгрузки природных газов [Осика, 1981; Войтов, Добровольский, 1994; Гуфельд и др., 2010]). А.А. Любушин указал на повышенную вероятность возникновения землетрясения в этом районе после 2010 г., т.е. в канун мегаземлетрясения Тохоку 11.03.2011, $M = 8.9-9.1$.

Важным примером применения эффективных прогнозных методов является ряд успешных среднесрочных прогнозов землетрясений на Сахалине, выданных И.Н. Тихоновым. Методом сейсмического затишья (выявления сейсмической бреши II рода) в 2006 г. был сделан среднесрочный прогноз землетрясения на юго-западном шельфе Сахалина, который реализовался в Невельском землетрясении 02.08.2007, $M = 6.2$ [Tikhonov, Kim, 2010]. Также был выдан прогноз Такойского роя землетрясений, июль–сентябрь 2001 г., с наиболее сильным событием 01.09.2001, $M = 5.6$ [Тихонов, 2001, 2002], и землетрясения Токачи-Оки 26.09.2003, $M = 8.0$, $M_w = 7.3$ у о. Хоккайдо, Япония [Тихонов, 2006; Tikhonov, Rodkin, 2012].

Для Невельского землетрясения 02.08.2007 Тихонову удалось сделать успешный краткосрочный прогноз на основе подходов Б. Войта (B. Voight), Д. Варнеса (D. Varnes) и модели саморазвивающихся процессов А.И. Малышева (близкой к описанию «режимов с обострением» в концепции синергетики). Во всех этих подходах быстрое, взрывное нарастание активности форшоков считается краткосрочным предвестником землетрясения.

Позже в обобщении [Тихонов и др., 2017] было выполнено ретроспективное моделирова-

ние последовательностей слабых ($M \sim 2.0-3.0$) мелкофокусных землетрясений юга Сахалина за период 2003–2014 гг. по методу саморазвивающихся процессов на основе данных каталога локальной сети. Построены математические модели нелинейного нарастания кумулятивной суммы числа толчков перед сильными ($M = 4.6-6.2$) событиями. Получены краткосрочные прогнозные оценки параметра T_0 (времени возникновения сильных толчков) с высокой степенью точности. Показана устойчивость получаемых решений при варьировании длительности интервала обработки данных каталога. Для дальнейших исследований немаловажно, что в обобщении [Тихонов и др., 2017] прогнозы формулировались и проверялись с учетом технических требований Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям. Эти требования к заблаговременности и интервалу магнитуд были несколько мягче тех, которые выдвигались в период оптимизма в XX в., т.е. допускались более широкие интервалы для времени и магнитуды прогнозируемого события. Если использовать «практичные», хотя и компромиссные требования к оценке прогнозов И.Н. Тихонова, можно заметить, что для них полностью соблюдается принцип проверки гипотетических прогнозов землетрясений, подобный описанному в работах [Evison, Rhoades, 1993, 1997].

Наличие нескольких удачных прогнозов землетрясений в южной части Сахалина и прилегающих акваториях можно увязывать с более или менее однородным (в сравнении с другими сейсмоопасными зонами) распределением направлений главных сжатия и растяжения вдоль протяженных разломов: Западно-Сахалинского и Центрально-Сахалинского [Тамарова, 2015; Сим и др., 2017, 2020]. В цитированных работах результат об упорядоченности (меньшей неоднородности) был получен по данным о структурно-геоморфологических и сейсмологических индикаторах напряженного состояния коры.

Упорядоченность поля напряжений – благоприятный фактор для развития новых или адаптации имеющихся методов (алгоритмов) прогноза землетрясений. Показательным примером можно считать разработанный в ИМГиГ ДВО РАН алгоритм SeisASZ [Закупин, 2016] для среднесрочного прогноза землетрясений по аномалиям параметра LURR

(load to unload response ratio), описывающего различие прироста деформации Бенъоффа в периоды двух разных фаз лунных приливов [Yin, Yin, 1991; Lockner, Beeler, 1999; Yin et al., 2001]. А.В. Николаевым параметр LURR был введен при анализе триггерного влияния лунно-солнечных приливов [Николаев, 1994; Природные... , 2000]. Китайскими сейсмологами было предложено использовать аномалии этого отношения (значительное отличие от единицы, т.е. значения, соответствующего упругой или вязко-упругой среде) в качестве прогнозного параметра [Yin et al., 1995]. Аномальные значения параметра LURR, т.е. значительное различие реакций среды на добавку и уменьшение нагрузки, указывают на стадию неупругой деформации среды в области готовящегося очага землетрясения и возникновение зоны запредельного деформирования [Закупин и др., 2020; Ребецкий, 2021]. Собственно, этот режим деформации и является признаком будущего землетрясения. По мере дальнейшего приближения к разрушению происходит локализация неупругой (запредельной) деформации, и параметр LURR, вычисляемый для большого охватывающего объема, возвращается к обычным значениям. Как показано в работах А.С. Закупина, сильные землетрясения на Сахалине происходят в сроки, не превышающие 2 лет после завершения аномалии параметра LURR [Закупин, 2016, Закупин и др., 2018]. С помощью алгоритма SeisASZ в оперативном режиме (не ретроспективно) были выявлены две зоны, где прогнозировались землетрясения. Впоследствии в них произошли землетрясения: Онорское, 14.08.2016, $M_w = 5.8$, и Крильонское, 23.04.2017, $M = 5.0$. Предсказанные значения времени и магнитуды соответствовали наблюдаемым [Закупин, Семенова, 2018]. На заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям оба прогноза были признаны реализованными. Таким образом, с помощью нового метода была подтверждена возможность прогноза землетрясений в южной части о. Сахалин, которая ранее отмечена в работах И.Н. Тихонова [Тихонов, 2006, 2009; Tikhonov, Rodkin, 2012] как удивительный прецедент предсказуемости. Параметр LURR может считаться одним из эффективных среднесрочных предвестников.

Относительно ионосферных предвестников можно упомянуть промежуточный результат – разработку в Институте прикладной геофизики (Росгидромет) комплексного метода анализа предвестников землетрясений, который использует спутниковые и наземные измерения полного электронного содержания ионосферы, температуры в нижних слоях атмосферы и ряда других параметров для выделения признаков приближения толчков. На данном этапе с помощью этой системы для землетрясений с $M > 5.5$ удавалось предсказывать время события с упреждением до пяти суток, причем место ожидаемого события считалось известным или надежно прогнозируемым другими методами. По статистике оправдывается около 60 % таких ионосферных прогнозов (Служба прогноза землетрясений, <https://ecportal.su/news/view/70133.html>). Предположительно, в дальнейшем возможно усовершенствование этой системы для краткосрочного прогноза сильных землетрясений.

Специалистами Сибирского отделения РАН и Сибирского НИИ геологии, геофизики и минерального сырья в 2012 г. был разработан метод активного мониторинга, при котором используются мощные вибрационные источники, создающие возмущения с амплитудой нагрузки до 100 т. Такие вибрационные источники позволяют получать данные о строении земной коры и, в перспективе, воздействовать на очаги готовящихся землетрясений для управляемой разрядки напряжений, т.е. инициировать слабые землетрясения и получать прогнозную информацию о вероятности сильных.

В завершение обзора подходов к прогнозу землетрясений приведем известные случаи заблаговременных прогнозов сильных землетрясений ($M > 5.5$), которые впоследствии подтвердились и поэтому считаются успешными (см. таблицу). В таблицу также включены 3 ретроспективных прогноза, сделанные в конце XX – начале XXI в., которые имели важное значение: они продемонстрировали, что критика достоверности предвестников землетрясения [Geller, 1991, 1997] может быть преодолена или существенно ослаблена.

Хотя количество успешных прогнозов, сделанных в реальном времени, невелико, но оно заведомо больше того, которое могло получиться при случайном угадывании. Это оз-

начает несостоятельность или, по крайней мере, ограниченность представлений о принципиальной непредсказуемости землетрясений. Большинство указанных в таблице прогнозов – среднесрочные. Краткосрочные прогнозы Хайченгского и Невельского землетрясений были сделаны после среднесрочных прогнозов, т.е. как уточнение при многоэтапном прогнозировании. Для всех 11 примеров удачных прогнозов землетрясений использовались различные сейсмологические предвестники, они сыграли ключевую роль для прогнозов, сделанных в режиме реального времени. Примеры прогнозов

землетрясений Токачи-оки, 2003 и Шикотанского, 1994 могут свидетельствовать о «работоспособности» алгоритмов M8 и MSc, хотя для практики крайне желательна более высокая эффективность.

Таблица свидетельствует, что результативность сейсмологических методов прогноза оказалась выше, чем других методов: геофизических (включая новейшие, ионосферные методы), геологических, гидрогеохимических. Так что ошибочным можно считать утверждение, что развитие современных сейсмических сетей не дало продвижения в этой области.

Таблица. Удачные прогнозы землетрясений с магнитудой $M > 5.5$

Дата	M	Название (место), страна	Вид прогноза, прогностические параметры. Литературный источник
04.02.1975	7.3	Хайченгское, Хайченг, Китай	<i>Форшоковые последовательности и другие аномалии.</i> Многоэтапный прогноз, включая краткосрочный. Долгое время это землетрясение считалось единственным прецедентом прогноза, в результате которого были своевременно поданы сигналы тревоги, стал очевидным факт спасения людей, покинувших здания [Raleigh et al., 1977; Wang et al., 2006]
16.08.1976	7.2	Сонгнан, Китай	<i>Форшоковые последовательности.</i> Многоэтапный прогноз [Raleigh et al., 1977; Jones et al., 1984]
29.05.1975	7.3	Лонглинг, Китай	<i>Форшоковые последовательности.</i> Успешные прогнозы землетрясений Сонгнан и Лонглинг оставались как бы в тени события Хайченг, поскольку в данном случае тревога не объявлялась. Они важны как подтверждение, что Хайченг – не уникальный случай [Raleigh et al., 1977]
04.10.1994	8.1	Шикотанское, Южные Курильские о-ва, Россия	<i>Предсказано с помощью алгоритма M8</i> в Институте теории прогноза землетрясений РАН [Kossobokov et al., 1990] и, независимо, в ИМГиГ ДВО РАН [Tikhonov, Rodkin, 2012].
05.12.1997	7.7	Кроноцкое, Камчатка, Россия	Ретроспективный [Завьялов, 2006]
25.09.2003	7.3	Токачи-оки, Хоккайдо, Япония	Ретроспективный [Shebalin et al., 2004; Тихонов, 2006; Tikhonov, Rodkin, 2012]
15.11.2006	8.3	Симуширское, Курило-Охотский регион, Россия	Долгосрочный [Федотов, 2005] Ретроспективный [Тихонов и др., 2008; Shebalin, 2006]
02.08.2007	6.1	Невельское, Сахалин, Россия	Среднесрочный прогноз по <i>появлению сейсмической бреши II рода</i> и краткосрочный прогноз по <i>нарастанию форшоковой активности</i> [Левин и др., 2007, 2007а; Тихонов, 2009; Tikhonov, Kim, 2008, 2010]
11.03.2011	9.1	Тохоку, Япония	Среднесрочный, по характеристикам <i>сейсмического шума</i> [Любушин, 2011]
30.01.2016	7.2	Жупановское землетрясение, Камчатка, Россия	<i>Сейсмологические, геофизические, геохимические предвестники.</i> Признаны успешными 3 прогноза разных авторов, сделанные в реальном времени [Болдина, Копылова, 2017; Ларионов и др., 2017; Фирстов и др., 2017; Gavrilov et al., 2020]
14.08.2016	5.8	Онорское, Сахалин, Россия	Среднесрочный прогноз по <i>параметру LURR</i> [Закупин и др., 2018]

Современные подходы к проблеме прогноза землетрясений

Несмотря на многолетний опыт использования данных о различных предвестниках землетрясений, задача прогнозирования времени землетрясений не решена. С одной стороны, накоплен огромный материал по проявлению различных предвестников и есть отдельные удачи, но с другой – в 90 % случаев сильное землетрясение возникает неожиданно. Такой результат показывает, что наши представления о механизме генерации землетрясений пока далеки от модели реального природного процесса (здесь надо согласиться с авторами работы [Bakun et al., 2005]). Многие представления о процессе подготовки землетрясения заимствованы из механики и не учитывают особенности строения сейсмогенных участков земной коры – разломных зон [Ребецкий, 2008].

Таким образом, при всем обилии проведенных и проанализированных наблюдений, место, время и магнитуда будущих разрушительных землетрясений даже в хорошо изученных регионах по-прежнему оказываются неожиданными. Тем не менее необходимо собирать новые, дополнительные данные. Но какие? Комплекс возможных параметров в том или ином многопризнаковом факторе можно варьировать и расширять беспредельно, однако рамки реальных возможностей заставляют как-то его ограничивать.

Многие исследователи предлагают свой путь исследования проблемы прогноза землетрясений.

Некоторые [Гольдин и др., 2001] главную научную проблему видят в том, что процесс подготовки землетрясений (тем более разные возможные его сценарии) недостаточно понят. Главная цель нового этапа мониторинговых исследований – это получение данных в очаговых зонах. Эти данные будут способствовать и более полному пониманию геодинамических процессов, заканчивающихся землетрясением, и построению теории физики очаговых зон.

Другие [Певнев, 2015] считают, что попытки решить проблему прогноза землетрясений без использования каких-либо моделей подготовки и реализации очагов землетрясений, методами обратных задач с помощью измерения и анализа разнородных аномалий в различных геофизических и других полях,

не увенчались успехом из-за некорректности постановки задач. А в работе [Певнев, 2016] представлены основные положения деформационной модели подготовки очага корового землетрясения (подтвердившей рациональность гамбургцевского пути к прогнозу коровых землетрясений), а также выводы из этой модели. Эти выводы позволяют сделать обоснованное заключение о том, что изучение деформаций земной поверхности геодезическими методами позволяет осуществлять точный прогноз места очага готовящегося землетрясения, а также определять максимальную силу, которую он способен породить. Для реализации этого прогноза необходимо на выбранном по тем или иным соображениям участке сейсмогенной зоны создать геодезическое построение, позволяющее с необходимой точностью определять вид деформаций земной поверхности на исследуемом участке, т.е. достоверно устанавливать вид упругого изгиба горных пород в случае, если на этом участке идет процесс подготовки очага землетрясения. В этой работе также рассматриваются такие вопросы, как прогноз силы и времени землетрясения, и предлагаются пути решения этих задач.

Согласно [Киссин, 2013], землетрясения необходимо рассматривать как систему, которая является частью более крупной системы – геодинамических процессов. Изучение этого природного явления требует системного подхода с целью выявления наиболее важных причинно-следственных связей. Для получения знаний, достаточных для осуществления практического прогноза, требуются комплексные исследования по двум основным направлениям:

- геосреда, ее структура, неоднородность и прочностные свойства, выделение участков, подверженных сейсмическим деформациям;
- характер напряженно-деформированного состояния геосреды; факторы, на него влияющие; тектонические напряжения, их распределение и изменения по силе и параметрам.

Первое направление – исследование среды, ее свойств и топологии с позиции построения формализованных теорий подготовки землетрясения – позволяет получить априорную информацию, необходимую для выделения объекта исследования из окружающей среды, а также информацию о структурном строении среды и объекта исследований – зоны форми-

рования очага. Согласно концепции геофизической среды М.А. Садовского [Садовский, 1986], которая в настоящее время является общепризнанной, геосреда имеет блоковое иерархическое самоподобное строение, которое и определяет возможность среды накапливать, перераспределять, поглощать и излучать энергию. Именно такие особенности строения среды определяют специфику сейсмических процессов [Садовский, Писаренко, 1991].

Геосреда обладает ярко выраженной неоднородностью, которая определяется литологией, тектоникой и двухфазностью (наличием флюидов) [Kissin, 1997]. Литологическая неоднородность среды обуславливает резкие различия в механических и прочностных свойствах пород в области формирующегося очага, которые могут достигать до 2–3 порядков по величине (например, для модуля Юнга). Поэтому сейсмический процесс и его подготовка будут иметь свои особенности для очагов, расположенных в глубоких частях мощного осадочного покрова, по сравнению с очагами в консолидированной коре, представленной кристаллическими породами.

Наряду с особенностями структуры геосреды (т.е. внутренними факторами) для успешных прогнозов землетрясений также важен учет внешних воздействий, которые могут служить триггерами для возникновения динамической подвижки в очаге [Соболев, 2011; Sobolev, 2011]. Это обусловлено самим фактом, что непосредственно перед землетрясением массив горной породы находится в состоянии, близком к неустойчивому равновесию, или, другими словами, в околокритическом состоянии. При таких состояниях могут происходить значительные деформации даже при небольших вариациях напряжения, возбуждаемых, в частности, внешними воздействиями [Соболев, Пономарев, 2003; Макаров и др., 2007; Гохберг, Колосницын, 2010]. При этом создаются условия для более интенсивных сейсмоэлектромагнитных взаимосвязей [Molchanov, Hayakawa, 2007] и, возможно, геофизических, в частности электромагнитных аномалий.

Реальность триггерных эффектов и их важная роль в сейсмическом процессе была подтверждена в экспериментах по физическому моделированию воздействий на очаг землетрясений [Садовский и др., 1981; Соболев и др., 1995; Соболев, Пономарев, 2003; Куксенко и др., 2003; Авагимов и др., 2011; Бучаченко,

2014; Мубассарова и др., 2014; Bogomolov et al., 2004]. В отсутствие внешних (триггерных) воздействий нахождение среды в состоянии метастабильного равновесия может быть весьма длительным. Переход к разрушению сплошности среды или подвижке по разлому происходит после внешнего воздействия, задержка укладывается в интервал, характерный для краткосрочных или среднесрочных прогнозов. Таким образом, контроль «триггеров» может улучшить предсказуемость землетрясений. Не исключено, что некоторые из прогнозов, приведенных выше в таблице, оказались успешными как раз в условиях триггерных воздействий на очаг готовящегося землетрясения.

В работе [Пантелеев, Наймарк, 2014] представлен обзор моделей подготовки тектонического землетрясения, базирующихся на подходах из различных отраслей знаний: механики деформируемого твердого тела, статистической физики, математической статистики, нелинейной физики. Особое внимание уделяется идеологии построения моделей в приложении к задаче прогноза землетрясений. Обсуждаются достоинства и недостатки существующих моделей и современные тенденции их развития. На основе сделанного обзора авторы пришли к выводу, что пессимизм относительно возможности прогноза крупного тектонического землетрясения, имевший место в научной среде на рубеже XX и XXI вв., сменяется оптимистичным взглядом в будущее благодаря новым достижениям в геомеханике, тектонофизике, геофизике, механике горных пород и других областях науки. Новую уникальную информацию для понимания процессов подготовки крупных землетрясений и разработки формализованных моделей, использующих подходы механики деформируемого твердого тела, по мнению авторов, дает разработка и развитие методов реконструкции тектонических напряжений сейсмоактивных участков земной коры [Ребецкий, 2003, 2007a]; определение строения, степени активности разломных зон земной коры [Семинский, 2009], а также их механизмов активизации, включая изменения глубинного флюидного режима [Шерман и др., 1999; Родкин, Рундквист, 2017]. Также высокозначимы лабораторные и натурные исследования строения и механизмов деформирования межблоковых контактов, разломов с учетом свойств

их заполнителя [Кочарян, 2010; Кочарян и др., 2011]; разработка и развитие методов комплексных геофизических непрерывных скважинных измерений, позволяющих отслеживать изменения характера напряженно-деформированного состояния геосреды в зоне наблюдений [Гаврилов, 2007; Гаврилов и др., 2014; Gavrilov et al., 2013].

В работе Ю.Л. Ребецкого [Ребецкий, 2008] рассматривается состояние теорий прогноза землетрясений, результаты оценки природных напряжений и новая модель очага. В частности отмечено, что многие представления о процессе подготовки землетрясения перекочевали из механики прочности конструкционных материалов и не учитывают особенности строения сейсмогенных участков земной коры – разломных зон. Согласно [Ребецкий, 2008], назрела необходимость говорить о разломах как об особых геологических телах, развитие которых предопределяется набором механохимических процессов, происходящих в них. Эти процессы формируют спектр специфических условий их деформирования и определяют аномальные характеристики различных физических полей. В работах других авторов, посвященных разломным зонам (см. библиографию в книге [Кочарян, 2016]), были сделаны аналогичные выводы.

Далее Ребецкий предлагает развивать методы мониторинга природного напряженного состояния, позволяющие получать данные о полном тензоре напряжений в земной коре и его изменениях (в частности данные о снятии напряжения в очагах землетрясений). В последнее время были разработаны методы реконструкции поля напряжений [Ребецкий, 2003, 2007б; Angelier, 1989; Гинтов, 2005]. Для дальнейшего развития этих методов нужно научиться оценивать прочностные параметры массивов горных пород в их естественном залегании. Напряжения прямо связаны с процессом разрушения и позволяют наиболее полно характеризовать стадию деформационного процесса.

В рамках представленного анализа процесс формирования аномально протяженного хрупкого разрыва (землетрясения) выглядит как случайный процесс, зависящий от сочетания в разломах участков с активной милонитизацией, дилатансией и метаморфизмом. На-

пряжения, действующие в разломных зонах, зависят от структурно-вещественного состояния слагающих их горных пород, температурного поля, флюидного режима этих зон и определяются региональной тектоникой земной коры. Геологическая среда является существенно неоднородной (в отличие от конструкционных материалов), что «автоматически» предопределяет неоднородность поля напряжений на разных масштабных уровнях осреднения. Как следствие, значения компонентов тензора природных напряжений существенно зависят от масштаба осреднения.

В условиях мозаичности поля напряжений весьма важными для оценки состояния разломов могут быть данные о снятии напряжений в очагах землетрясений, умеренных по силе [Сычева, Богомолов, 2016, 2020]. Снижение уровня снятия напряжений в очагах землетрясений таких же магнитуд, как в предшествующий период, может рассматриваться как еще один среднесрочный предвестник. Его физический смысл заключается в том, что необходимым геомеханическим условием сильного землетрясения является недостаточная (по сравнению с обычным асейсмичным периодом) эффективность высвобождения энергии и сброса напряжений при мало- и среднемагнитудных землетрясениях. Для проверки гипотезы нужен большой объем данных об очаговых параметрах (в частности, снятии напряжений), получение которых стало возможным лишь в последние годы [Сычева и др., 2020].

Несомненно, новые модели очага землетрясения и теоретические подходы к прогнозам (объяснению предвестников) станут основой новых прогнозных методик и алгоритмов. Но пока эта весьма нетривиальная задача находится на стадии разработки, сохраняют свое практическое значение более «старые», но уже работающие методы прогноза землетрясений, которые обсуждались в предыдущем разделе.

В предвидении дальнейших обсуждений перспектив исследований по прогнозам землетрясений (включая краткосрочные) хочется процитировать слова из статьи «Cannot earthquakes be predicted?»: «At the time of Columbus, most experts asserted that one could not reach India by sailing from Europe to the west and that funds should not be wasted on such a folly»* [Wyss et al., 1997]. И добавить, что запад-

ный путь в Индию оказался длинным и затратным, но экспедиция Колумба все же оправдала расходы. Бесперспективно отказываться от научного и социального вызова, каким является проблема прогноза землетрясений, даже если кому-то эта цель кажется недостижимой.

Заключение

После многолетней дискуссии о возможности (невозможности) прогноза землетрясений на 35-й Генеральной ассамблее Международной ассоциации по сейсмологии и физике недр Земли (МАСФНЗ), проходившей в Кейптауне в январе 2009 г., была принята специальная резолюция об исследованиях и предсказуемости землетрясений. В этой резолюции МАСФНЗ, осознавая возможности, которые предоставляют недавние события для изучения землетрясений, рекомендует научному сообществу поддерживать исследования по прогнозу и предсказуемости землетрясений, их аттестации и сравнительному испытанию методов прогноза.

Изложенные в обзоре материалы показывают, что, хотя проблема прогноза землетрясений все еще далека от решения, есть заметное продвижение в исследованиях по этой проблеме. Это подтверждается тем, что случаи удачных среднесрочных прогнозов времени и места землетрясения (сделанных не ретроспективно, а в реальном времени) уже не единичны. Разработка методов и подходов к краткосрочному прогнозу землетрясений остается злободневной задачей, которая может иметь (или нет?) эффективное решение. Однако есть основания полагать, что совершенствование методов среднесрочных прогнозов приблизят их к краткосрочным благодаря сокращению времени упреждения события до сопредельного диапазона (около месяца). Эта тенденция прослеживается в среднесрочных прогнозах, сделанных в последнее десятилетие.

Для дальнейших исследований важно, что фактически было обнаружено наличие отдельных сейсмоопасных зон, «допускающих» такие прогнозы. Одной из этих зон является южная часть о. Сахалин, для которой был отмечен прецедент «предсказуемости» землетрясений с магнитудами $M < 7$. Во всех этих зонах и в прилегающих к ним регионах перспективно

проведение новых исследований геологического строения среды, ее геомеханических свойств, а также закономерностей сейсмического процесса для развития и совершенствования подходов к прогнозу землетрясений.

Список литературы

1. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Окунев В.И. 2011. Динамика энергообменных процессов в модельных образцах при воздействии упругим и электромагнитным полями. *Физика Земли*, 10: 64–70. EDN: OJGOND
2. Анциферов М.С. 1969. О возможностях геоакустического прогноза местных землетрясений. В кн.: *Труды всероссийского симпозиума по сейсмическому режиму (3–7 июня 1968 г.)*. Новосибирск, ч. 2, с. 28–141.
3. Арутюнян А.Р. 2010. Современные методы сейсмоизоляции зданий и сооружений. *Инженерно-строительный журнал*, 3: 56–60.
4. Барсуков О.М. 1970. О связи электрического сопротивления горных пород с тектоническими процессами. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 1: 84–89.
5. Болдина С.В., Копылова Г.Н. 2017. Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., $M_w=7.2$, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(4): 863–880. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321>
6. Бончковский В.Ф. 1954. Изменения градиента электрического потенциала в атмосфере как один из возможных предвестников землетрясений. *Труды Геофизического института*, 25(152): 192–206.
7. Бучаченко А.Л. 2014. Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу. *Успехи физических наук*, 189(1): 101–108.
8. Бучаченко А.Л., Ораевский В.Н., Похотелов О.А., Сорокин В.М., Страхов В.Н., Чмырев В.М. 1996. Ионосферные предвестники землетрясений. *Успехи физических наук*, 166(9): 1023–1029.
9. Войтов Г.И., Добровольский И.П. 1994. Химические и изотропно-углеводные нестабильности потоков природных газов в сейсмически активных регионах. *Физика Земли*, 3: 20–31.
10. Воробьев А.А., Самохвалов М.А., Горелкин А.Ф. и др. 1976. Аномальные изменения интенсивности естественного электромагнитного поля в районе Ташкента перед землетрясением. *Узбекский геологический журнал*, 2: 9–11.
11. Гаврилов В.А. 2007. Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии. *Доклады АН*, 414(3): 389–392. EDN: IAQDXJ
12. Гаврилов В.А., Пантелеев И.А., Рябинин Г.В. 2014. Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов. *Физика Земли*, 1: 89–103. EDN: RLWIFL
13. Гамбурцев Г.А. 1955. Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений. *Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР*, 1: 7–14.
14. Гинтов О.Б. 2005. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 572 с.

* Во времена Колумба большинство экспертов утверждали, что невозможно добраться до Индии, плывя из Европы на запад, и что средства не следует тратить впустую на такую глупость. (Перевод авторов).

15. Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Дашевский Ю.А. **2001**. Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне. *Геология и геофизика*, 42(10): 1484–1496.
16. Гохберг М.Б., Колосницын Н.И. **2010**. Триггерные механизмы землетрясений. В кн.: *Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Всероссийского семинара-совещания, г. Москва, 22–24 июня 2010 г.* М.: ГЕОС, с. 52–61.
17. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Аронов Е.Л. **1979**. О высокочастотном электромагнитном излучении при сейсмической активности. *Доклады АН СССР*, 248(5): 1077–1081.
18. Гуфельд И.Л., Афанасьев А.В., Афанасьева В.В., Новоселов О.Л. **2010**. Триггерные эффекты сеймотектонического процесса в динамически меняющейся геологической среде. *Доклады АН*, 433(1): 92–96.
19. Гуфельд И.Л., Матвеева М.И., Новоселов О.Л. **2011**. Почему мы не можем осуществить прогноз сильных землетрясений. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2(4): 378–415. <https://doi.org/105800/GT-2011-2-4-0051>
20. Добровольский И.П. **1991**. *Теория подготовки тектонического землетрясения*. М.: ИФЗ РАН, 218 с.
21. Друмя А.В. **1985**. *Землетрясение: где, когда, почему?* Отв. ред. М.А. Садовский. Кишинев: Штиинца, 196 с.
22. Завьялов А.Д. **1986**. Параметр концентрации сейсмогенных разрывов как предвестник сильных землетрясений. *Вулканология и сейсмология*, 3: 58–71.
23. Завьялов А.Д. **2006**. *Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы, методика, реализация*. М.: Наука, 242 с.
24. Закупин А.С. **2016**. Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса. *Геоинформатика*, 1: 34–43.
25. Закупин А.С., Семенова Е.П. **2018**. Исследование процесса подготовки сильных землетрясений ($M_w > 5$) на Сахалине методом LURR. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 5(25): 83–98. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98>
26. Закупин А.С., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. **2018**. Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Онорского землетрясения на Сахалине ($M_w=5.8$, 14 августа 2016 года). *Геология и геофизика*, 11: 1904–1911.
27. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Богинская Н.В. **2020**. Применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине. *Геофизические процессы и биосфера*, 19(1): 66–78. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4>
28. Захарова А.И., Рогожин Е.А. **2000**. Сильные землетрясения северо-западной окраины Тихого океана и их глубокофокусные предвестники. *Вестник ОИФЗ РАН*, 2-1(12): 82–94
29. Захарова А.И., Рогожин Е.А. **2001**. Глубокофокусные предвестники сильных землетрясений. *Доклады АН*, 381(6): 825–826. EDN: KHESLY
30. Захарова А.И., Рогожин Е.А. **2004**. Пространственно-временные соотношения очагов сильных землетрясений и их глубокофокусных предвестников. В кн.: *Исследования в области геофизики (к 75-летию ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта)*. М.: ОИФЗ РАН, с. 13–19.
31. Зубков С.И. **2002**. *Предвестники землетрясений*. М.: ИФЗ РАН, 140 с.
32. Кейлис-Борок В.И., Малиновская Л.Н. **1966**. Об одной закономерности в возникновении сильных землетрясений. В кн.: *Сейсмологические методы исследований*. М.: Наука, с. 88–97.
33. Киссин И.Г. **2013**. О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений. *Физика Земли*, 4: 145–160. DOI: 10.7868/S0002333713040054
34. Короновский Н.В., Наймарк А.А. **2012**. Непредсказуемость землетрясений как фундаментальное следствие нелинейности геодинамических систем. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*, 6: 3–12. EDN: PRGNYT
35. Короновский Н.В., Захаров В.С., Наймарк А.А. **2019**. Краткосрочный прогноз землетрясений: реальность, научная перспектива или проект-фантом? *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*, 3: 3–12. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-3-3-12>
36. Кособоков В.Г. **2005**. *Прогноз землетрясений и геодинамические процессы*. Ч. 1. *Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы*. М.: ГЕОС, 172 с. (Вычислительная сейсмология; вып. 36).
37. Кособоков В.Г., Ротвайн И.М. **1977**. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. VI. Магнитуда $M > 7,0$. В кн.: *Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии*. М.: Наука, с. 3–18.
38. Кочарян Г.Г. **2010**. Разломная зона как нелинейная механическая система. *Физическая мезомеханика*, 13 (Спец. вып.): 5–17. EDN: NQXHWX
39. Кочарян Г.Г. **2016**. *Геомеханика разломов*. М.: ГЕОС, 424 с.
40. Кочарян Г.Г., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. **2011**. Экспериментальное исследование закономерностей деформирования малопрочных тонких слоев геоматериалов. *Физическая мезомеханика*, 14(6): 63–70.
41. Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Тилегенов К. и др. **2003**. Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах). *Физика твердого тела*, 45(12): 2182–2186. EDN: RCZSWP
42. Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Мищенко М.А., Солдчук А.А., Щербина А.О. **2017**. Исследования акустической эмиссии приповерхностных осадочных пород на Камчатке. *Геосистемы переходных зон*, 1(3): 57–63. doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.057-063
43. Левин Б.В., Сасорова Е.В., Ким Ч.У., Коровин М.Е., Малашенко А.Е., Савочкин П.В., Тихонов И.Н. **2007a**. Землетрясение 17(18) августа 2006 г. на Сахалине и первая реализация комплексного прогноза. *Доклады АН*, 412(3): 396–400. EDN: IAAJZH
44. Левин Б.В., Ким Чун Ун, Тихонов И.Н. **2007b**. Горно-заводское землетрясение 17(18) августа 2006 г. на о-ве Сахалин. *Тихоокеанская геология*, 26(2): 102–108.
45. Любушин А.А. **2011**. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотному микросейсмическому шуму. *Геофизические процессы и биосфера*, 10(1): 9–35. EDN: NDZZMV
46. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Кузнецов П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П., Ворошилов Я.С. **2007**. *Нелинейная механика геоматериалов и геосред*. Новосибирск: ГЕО, 235 с.
47. Малинецкий Г.Г., Подлазов А.В. **1997**. Парадигма самоорганизованной критичности. Иерархия моделей и пределы предсказуемости. *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*, 5(5): 89–106.
48. Мамадалиев Ю.А. **1964**. Об исследовании параметров сейсмического режима во времени и пространстве.

- В кн.: *Вопросы региональной сейсмичности Средней Азии*. Фрунзе: Илим, с. 93–104.
49. Мещеряков Ю.А. 1968. Изучение современных движений земной коры и проблема прогноза землетрясений. В кн.: *Современные движения земной коры*. М.: ВИНТИ, 3, с. 44–62.
50. Милькис М.Р. 1986. Метеорологические предвестники сильных землетрясений. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 3: 36–47.
51. Могил К. 1988. *Предсказание землетрясений*. Пер. с англ. Б.А. Борисова. М.: Мир, 382 с.
52. Моргунов В.А. 1999. Реальности прогноза землетрясений. *Физика Земли*, 1: 79–91.
53. Мубассарова В.А., Богомолов Л.М., Закупин А.С., Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. 2014. Особенности локализации деформации и распределения очагов акустической эмиссии в образцах горных пород под воздействием одноосного сжатия и электрических импульсов *Геодинамика и тектонофизика*, 5(4): 919–938. EDN: TDMROT
54. Николаев В.А. 1994. Пространственно-временные особенности связи сильных землетрясений с приливными фазами. В кн.: *Наведенная сейсмичность*. М.: Наука, с. 103–114.
55. *Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации*: Пояснительная записка к комплексу карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах. Гл. ред. В.И. Уломов, М.И. Богданов. 73 с. http://seismos-u.ifz.ru/documents/zapiska_OCR_2016.pdf
56. Осика Д.Г. 1981. *Флюидный режим сейсмически активных областей*. М.: Наука, 201 с.
57. Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. 2014. Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений. *Вестник Пермского научного центра УрО РАН*, 3: 44–62. EDN: TDURFP
58. Паровышний В.А., Сеначин В.Н., Веселов О.В., Кочергин Е.В. 2015. Временные изменения естественных геофизических полей в связи с проблемой прогноза сейсмических событий. *Геодинамика и тектонофизика*, 6(1): 63–76. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0172>
59. Певнев А.К. 2015. Прогноз землетрясений возможен (О месте геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений). Ч. 1. Г.А. Гамбурцев и возможность прогнозирования землетрясений. *Пространство и Время*, 4(22): 195–201.
60. Певнев А.К. 2016. Прогноз землетрясений возможен (О месте геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений). Ч. 2. Возвращение к Г.А. Гамбурцеву: деформационная модель подготовки очага корового землетрясения. *Пространство и Время*, 1–2(23–24): 227–238. URL: https://space-time.ru/space-time/article/view/2226-7271prov_r_st1_2-23_24.2016.91
61. *Природные опасности России. Сейсмические опасности*. 2000. Отв. ред. Г.А. Соболев. М.: Крук, 296 с.
62. Ребецкий Ю.Л. 2003. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений. *Доклады РАН*, 388(2): 237–241.
63. Ребецкий Ю.Л. 2007а. Состояние и проблемы теории прогноза землетрясений. Анализ основ с позиции детерминированного подхода. *Геофизический журнал*, 29(4): 92–110.
64. Ребецкий Ю.Л. 2007б. *Тектонические напряжения и прочность горных массивов*. М.: Академкнига, 406 с.
65. Ребецкий Ю.Л. 2008. Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений. В кн.: *Проблемы тектонофизики: К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН*. М.: ИФЗ РАН, с. 359–395.
66. Ребецкий Ю.Л. 2021. К теории детерминированного прогноза землетрясений методом LURR. *Геосистемы переходных зон*, 5(3): 192–222. (На рус. и англ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.3.192-208.208-222>
67. Рикитак Т. 1979. *Предсказание землетрясений*. М.: Мир, 388 с.
68. Рогожин Е.А., Иогансон Л.И., Завьялов А.Д. и др. 2011. *Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений – основа реально-геофизического прогноза*. М.: Светоч Плюс, 368 с. EDN: THIGTP
69. Родкин М.В., Рундквист Д.В. 2017. *Геофлюидодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза*. Долгопрудный: Изд. дом Интеллект, 288 с.
70. Ружич В.В. 1996. О среднесрочном прогнозе землетрясений в Прибайкалье. В кн.: *Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века*. Новосибирск: Наука, с. 143–147.
71. Садовский М.А. 1986. Автомодельность геодинамических процессов. *Вестник АН СССР*, 8: 3–11.
72. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. 1991. *Сейсмический процесс в блоковой среде*. М.: Наука, 96 с.
73. Садовский М.А., Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Саломов Н.Г. 1981. Влияние механических вибраций на характер пластических деформаций материалов. *Физика Земли*, 6: 32–42.
74. Салтыков В.А. 2016. Приливные эффекты в высокочастотных сейсмических шумах в сейсмическом регионе: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 48 с.
75. Семинский К.Ж. 2009. Тектонофизический анализ внутренней структуры разломных зон. В кн.: *Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы первой молодежной школы-семинара*. М.: ИФЗ РАН, 1, с. 258–276.
76. Сидорин А.Я. 1992. *Предвестники землетрясений*. М.: Наука, 192 с.
77. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. 2017. Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(1): 181–202. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
78. Сим Л.А., Каменев П.А., Богомолов Л.М. 2020. Новые данные о новейшем напряженном состоянии земной коры острова Сахалин (по структурно-геоморфологическим индикаторам тектонических напряжений). *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 372–383. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383>
79. Симбирева И.Г., Лукк А.А., Нерсесов И.Л. 1974. Изменение динамических параметров очагов слабых землетрясений Гармского района в связи с возникновением сильных землетрясений. В кн.: *Региональные исследования сейсмического режима*. Кишинев: ШТИНЦА, с. 138–153.
80. Смирнова М.Н. 1971. О влиянии слабых землетрясений на режим Пятигорских минеральных источников. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 7: 80–83.
81. Соболев Г.А. 1993. *Основы прогноза землетрясений*. М.: Наука, 313 с. EDN: TGSIGN

82. Соболев Г.А. **1999**. Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений. *Вулканология и сейсмология*, 4/5: 63–72. EDN: RZYUFX
83. Соболев Г.А. **2003**. Перспективы прогноза землетрясений. В кн.: *Проблемы геофизики XXI века*. М.: Наука, с. 158–178.
84. Соболев Г.А. **2011**. *Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии*. М.: ИФЗ РАН, 56 с.
85. Соболев Г.А., Морозов В.Н. **1970**. Локальные возмущения электрического поля на Камчатке и их связь с землетрясениями. В кн.: *Физические основания поисков методов прогноза землетрясений*. М.: Наука, с. 110–121.
86. Соболев Г.А., Пономарев А.В. **2003**. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука, 270 с.
87. Соболев Г.А., Тюткин Ю.С. **1996**. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильным землетрясением. *Вулканология и сейсмология*, 4: 64–74. EDN: SGJVPZ
88. Соболев Г.А., Тюткин Ю.С. **1998**. Стадии подготовки, сейсмологические предвестники и прогноз землетрясений Камчатки. *Вулканология и сейсмология*, 6: 17–26. EDN: RZZZQV
89. Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В. **1995**. Возбуждение колебаний в модели сейсмического источника. *Физика Земли*, 12: 72–78. EDN: QFFFDE
90. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. **2016**. Закономерности падения напряжений при землетрясениях Северного Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*, 57(11): 2071–2083.
91. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. **2020**. О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии. *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 393–446. <https://doi.org/10.30730/grtz.2020.4.4.393-416.417-446>
92. Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Кузиков С.И. **2020**. *Вычислительные технологии в сейсмологических исследованиях (на примере KNET, Северный Тянь-Шань)*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 358 с.
93. Такаги А., Исибаси К., Суйсиро С., Усами Т., Матсуда Т., Асада Т., Йосии Т., Вакига Х., Саго Х., Мидзутани Х. **1984**. *Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии*. М.: Недра, 287 с.
94. Тагаурова А.А. **2015**. Поля напряжений и деформаций по данным механизмов коровых землетрясений о. Сахалин. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 3: 93–101.
95. Тихонов И.Н. **2001**. О долговременной цикличности сильнейших ($M > 7.5$) землетрясений в районе Южных Курильских островов. В кн.: *Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана*. Южно-Сахалинск, 1, с. 23–33.
96. Тихонов И.Н. **2002**. Закон повторяемости отрезков времени между последовательными землетрясениями. *Доклады АН*, 387(2): 250–252. EDN: PSYRMC
97. Тихонов И.Н. **2006**. *Методы анализа каталогов землетрясений для целей средне- и краткосрочного прогнозов сильных сейсмических событий*. Владивосток; Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 214 с.
98. Тихонов И.Н. **2009**. Прогноз сильного землетрясения на юго-западном шельфе о. Сахалин и его реализация в результате Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. *Тихоокеанская геология*, 28(5): 22–29.
99. Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Левин Ю.Н., Прытков А.С., Фролов Д.И. **2008**. Симуширские землетрясения 2006–2007 гг. – новая страница в истории курильской сейсмоактивной зоны. В кн.: *Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России*: Труды регионал. науч.-техн. конф. Петропавловск-Камчатский, 1, с. 215–219.
100. Тихонов И.Н., Михайлов В.И., Малышев А.И. **2017**. Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предвещающих сильные толчки, с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 5–14. EDN: XWRJZN
101. Уломов В.И. **1971**. *Внимание! Землетрясение!* Ташкент: Узбекистан, 160 с.
102. Уломов В.И., Мавашев Б.З. **1971**. Предвестники Ташкентского землетрясения. В кн.: *Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 года*. Ташкент: ФАН Узб. ССР, с. 188–192.
103. Федотов С.А. **2005**. *Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской зоны*. М.: Наука, 303 с.
104. Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухова И.П. **2017**. Особенности динамики подпочвенных газов перед Жупановским землетрясением 30.01.2016 г. с $M = 7.2$ (Камчатка). *Доклады АН*, 472(4): 462–465. <https://doi.org/10.7868/S0869565217040144>
105. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Черемных А.В. **1999**. Деструктивные зоны и разломно-блоковые структуры Центральной Азии. *Тихоокеанская геология*, 18(2): 41–53.
106. Щекотов А.Ю., Чебров В.Н., Берсенева Н.Ю. **2015**. Электромагнитные предвестники Олоторского и Охотоморского землетрясений. В кн.: *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: труды Пятой науч.-техн. конф.: к 100-летию организации инструментальных сейсмологических наблюдений на Камчатке, Петропавловск-Камчатский, 27 сентября – 3 октября 2015 года*. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, с. 311–315. EDN VPYСJN
107. Юнга С.Л. **1996**. Ретроспективный анализ временных вариаций тензоров сейсмических моментов в очаговой зоне Шикотанского землетрясения. *Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень*, 2(2): 24–40.
108. Юнга С.Л. **1999**. Сравнительный анализ сеймотектонических деформаций в областях активных геодинамических режимов. В кн.: *Геофизика на рубеже веков: Избр. труды ученых ОИФЗ РАН*. М.: ОИФЗ РАН, с. 253–264.
109. Angelier J. **1989**. From orientation to magnitude in paleostress determinations using fault slip data. *J. of Structural Geology*, 11(1-2): 37–49. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90034-5](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90034-5)
110. Bak P., Tang C. **1989**. Earthquake as a self-organized critical phenomenon. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B11): 15635–15637. <https://doi.org/10.1029/jb094ib11p15635>
111. Bakun W.H., Aagaard B., Dost B., Ellsworth W.L. et al. **2005**. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake. *Nature*, 437(7061): 969–974. <https://doi.org/10.1038/nature04067>
112. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Novikov V.A., Okunev V.I., Sychev V.N., Zakupin A.S. **2004**. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation. *Annals of Geophysics*, 47(1): 65–72. <https://doi.org/10.4401/ag-3259>
113. Bormann P. **2011**. From earthquake prediction research to time-variable seismic hazard assessment applications. *Pure Applied Geophysics*, 168(1-2): 329–366. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0114-0>

114. Coble R.W. **1965**. The effects of the Alaskan earthquake of March 27, 1964, on ground water in Iowa. *Proceedings of the Iowa Academy of Science*, 72: 323–332.
115. Evison F.F., Rhoades D.A. **1993**. The precursory earthquake swarm in New Zealand: Hypothesis tests. *New Zealand J. of Geology and Geophysics*, 36(1): 51–60. <https://doi.org/10.1080/00288306.1993.9514553>
116. Evison F.F., Rhoades D.A. **1997**. The precursory earthquake swarm in New Zealand: Hypothesis tests. II. *New Zealand J. of Geology and Geophysics*, 40(4): 537–547. <https://doi.org/10.1080/00288306.1997.9514782>
117. Fujii Y. **1966**. Gravity change in the shock area of Niigata earthquake? 16 June 1964. *Zisin (J. of the Seismological Society of Japan. Ser. 2)*, 19(3): 202–216. https://doi.org/10.4294/zisin1948.19.3_200
118. Gavrillov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V., Morozova Yu.V. **2013**. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoacoustic emission of rocks. *Russian J. of Earth Science*, 13(1): 1–16. <https://doi.org/10.2205/2013es000527>
119. Gavrillov V.A., Panteleev I.A., Descherevskii, Lander A.V., Morozova Yu.V., Buss Yu.Yu., Vlasov Yu.A. **2020**. Stress-strain state monitoring of the geological medium based on the multi-instrumental measurements in boreholes: Experience of research at the Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic testing site (Kamchatka, Russia). *Pure Applied Geophysics*, 177(1): 397–419. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02311-3>
120. Geller R.J. **1991**. Shake up for earthquake prediction. *Nature*, 352: 275–276. <https://doi.org/10.1038/352275a0>
121. Geller R.J. **1996**. Debate on evaluation of the VAN Method: Editor's introduction. *Geophysical Research Letters*, 23(11): 1291–1293. <https://doi.org/10.1029/96gl00742>
122. Geller R. **1997**. Earthquake prediction: critical review. *Geophysical J. International*, 131(3): 425–450. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1997.tb06588.x>
123. Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. **1997**. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275(5306): 1616. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>
124. Hayakawa M., Molchanov O.A. (eds.) **2002**. *Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Tokyo: Terra Scientific Publ., 477 p.
125. Hayakawa M., Molchanov O.A., Ondoh T., Kawai E. **1996**. Precursory signature of the Kobe earthquake on VLF sub-ionospheric signal. *J. of Atmospheric Electricity*, 16(3): 247–257.
126. Jones L.M., Han W., Hauksson E., Jin A., Zhang Y., Luo Z. **1984**. Focal mechanisms and aftershock locations of the Songpan earthquakes of August 1976 in Sichuan, China. *Geophysical Research Letters*, 89(B9): 7697–7707. <https://doi.org/10.1029/jb089ib09p07697>
127. Kato Y., Utashiro Sh. **1949**. On the changes of the terrestrial magnetic field accompanying the great Nankaido earthquake of 1946. *Science Reports of Tohoku University, Japan. Ser. 5*, 1: 40.
128. Kissin I.G. **1997**. Middle and short-term precursors of earthquakes and their factors determining reliability. *J. Earthquake Prediction Research*, 6(3): 367–386.
129. Knopoff L. **1996**. Earthquake prediction: The scientific challenge. *Proceedings of The National Academy of Science*, 93(9): 3719–3720. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.9.3719>
130. Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.W. **1990**. Localization of intermediate-term earthquake prediction. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(12): 19763–19772. <https://doi.org/10.1029/jb095ib12p19763>
131. Lockner D.A., Beeler N.M. **1999**. Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B9): 20133–20151. <https://doi.org/10.1029/1999jb900205>
132. Mervis J. **1990**. Earthquake scientists hope that recent rumblings will lead to more funding. *The Scientist*, April 2. <https://www.the-scientist.com/news/earthquake-scientists-hope-that-recent-rumblings-will-lead-to-more-funding-61400>
133. Molchanov O., Hayakawa M. **2007**. *Seismo-electromagnetics and related phenomena: History and latest results*. Tokyo: Terra Scientific Publ., 432 p.
134. Raleigh C.B., Bennett G., Craig H., Hanks T., Molnar P., Nur A., Savage J., Scholz C., Turner R., Wu F. **1977**. Prediction of the Haicheng earthquake. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 72: 236–272. <https://doi.org/10.1029/ea058i005p00236>
135. Reid H.F. (ed.) **1910**. *The California earthquake of April 18 1906. Vol. 2. The mechanisms of the earthquake*. Washington: Carnegie Inst. Wash.
136. Rikitake T. **1966**. A five year plan for earthquake prediction research in Japan. *Tectonophysics*, 3: 1–15. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(66\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(66)90021-7)
137. Roeloffs E., Langbein J. **1994**. The earthquake prediction experiment at Parkfield, California. *Reviews of Geophysics*, 32(3): 315–335. <https://doi.org/10.1029/94rg01114>
138. Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Schwingsenschuh K., Boudjada M., Biagi P.F., Maggipinto T., Castellana L., Ermini A., Hayakawa M. **2009**. Anomalies in VLF radio signals prior the Abruzzo earthquake (M = 6.3) on 6 April 2009. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 9: 1727–1732.
139. Scholz C. **1997**. What ever happened to earthquake prediction? Reprint. with permission from *Geotimes*, vol 17, March 1997. Copyright the American Geological Institute, 1997. URL: <https://earthquake.usgs.gov/learn/parkfield/scholz.html> (accessed 04.09.2022).
140. Scholz C. **2002**. *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 496 p.
141. Shebalin P. **2006**. Increased correlation range of seismicity before large events manifested by earthquake chains. *Tectonophysics*, 424(3-4): 335–349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2006.03.040>
142. Shebalin P., Keilis-Borok V., Zaliapin I., Uyeda S., Nagao T., Tsybin N. **2004**. Advance short-term prediction of the large Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003, M=8.1. A case history. *Earth, Planets and Space*, 56: 715–724. <https://doi.org/10.1186/bf03353080>
143. Snieder R., van Eck T. **1997**. Earthquake prediction: a political problem? *Geologische Rundschau*, 86: 446–463. <https://doi.org/10.1007/s005310050153>
144. Sobolev G.A. **2011**. Seismicity dynamics and earthquake predictability. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 445–458. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-445-2011>
145. Sobolev G.A., Chelidze T.L., Zavyalov A.D., Slavina L.B., Nikoladze V.E. **1991**. Maps of expected earthquakes based on a combination of parameters. *Tectonophysics*, 193(4): 255–265. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90335-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90335-P)
146. Tikhonov I.N., Kim Ch. U. **2008**. A successful prediction of the Nevel'sk August 2, 2007, earthquake (MLH=6.2) in southern Sakhalin Island. *Doklady Earth Sciences*, 420(1): 704–708. <https://doi.org/10.1134/s1028334x08040417>

147. 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>
148. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. **2012**. The current state of art in earthquake prediction, typical precursors, and experience in earthquake forecasting at Sakhalin Island and surrounding areas. In: *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*, Ch. 5, p. 43–78. <https://doi.org/10.5772/28689>
149. Torunbalci N. **2004**. Seismic isolation and energy dissipating systems in earthquake resistant design. In: *13th World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6*. Paper No. 3273. URL: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_3273.pdf
150. Wang K., Chen Q-F., Sun S., Wang A. **2006**. Predicting the 1975 Haicheng Earthquake. *Bull. of the Seismological Society of America*, 96(3): 757–795. <https://doi.org/10.1785/0120050191>
151. Wyss M. et al. **1997**. Cannot earthquakes be predicted? *Science*, 278(5337): 487–490. https://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Cannot%20earthquakes%20be%20predicted%3F&journal=Science&volume=278&publication_year=1997&author=Aceves%2CRL&author=Park%2CSK (accessed 05.09.2022)
152. Yin X., Yin C. **1991**. The precursor of instability for non-linear system and its application to earthquake prediction. *Science in China*, 34: 977–986.
153. Yin X.C. et al. **1995**. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 145(3/4): 701–715. <https://doi.org/10.1007/bf00879596>
154. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. **2001**. Development of a new approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 157: 2365–2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7_29

REVIEW

TRANSLATION

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.164-182>
<https://www.elibrary.ru/nhwrtf>

Earthquake predictions in XXI century: prehistory and concepts, precursors and problems

Leonid M. Bogomolov^{*1}, Nailia A. Sycheva²

^{*}E-mail: bleom@mail.ru

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

²Shmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

Abstract. The review presents the most important results of investigations in the field of strong earthquake predictions, which were published in scientific sources. The ways of further studies of seismic prognosis problem are involved into consideration, as well as the based theoretical model, to improve predictive methods and algorithms. One can follow the research transformation from initial (historical) articulation of this intriguing problem to its current state of the art, including modern approaches based on the data of seismological and geophysical monitoring, and as well as ionospheric and atmospheric surveys. Examples of successful earthquake predictions have been discussed and treated from viewpoint of the potential of used methods, at least for some regions (for example, Sakhalin and Kamchatka). It is assumed that the predictions, which were realized due to certain algorithms and/or working precursors rather than random guessing, are able to weaken the pessimist side in the discussion: are earthquakes predictable or unpredictable in principle.

Keywords: earthquake, predictive methods, mid-term prediction, short-term prediction, geophysical, seismological precursors, source-site model, fault

For citation: Bogomolov L.M., Sycheva N.A. Earthquake predictions in XXI century: prehistory and concepts, precursors and problems. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 145–182. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.145-164.164-182>; <https://www.elibrary.ru/nhwrtf>

Introduction

Earthquake prediction has long been understood as predicting the area (location), time and magnitude (energy) of the expected seismic event [Zubkov, 2002]. At present, the prediction of the

earthquake location and strength for a long time (long-term prognosis) is generally associated with seismic zoning of various levels of detail: general seismic zoning (GSZ), detailed and microseismic ones. General seismic zoning is of practical im-

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Л.М. Богомолов, Н.А. Сычева. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы. *Translation by G.S. Kachesova.*

portance for designing buildings and constructions in seismically dangerous regions. Indeed, the GSZ maps can be interpreted as a probabilistic prediction for decades, i.e. the longest period considered by seismologists. The maximum intensity of seismic shocks (in points) is estimated [*General seismic...*, 2016]. The GSZ is implemented on the basis of a set of criteria and characteristics: density of earthquakes hypocenters, energy and intensity of events, geological and geophysical characteristics of recurrence graphs, maximum magnitudes (M_{\max}), shaking, seismic activity and other macroseismic data [*Drumya*, 1985; *Shebalin*, 2006; *Shebalin et al.*, 2004; etc.].

Development of methods for seismic zoning and problems of its practical implementation have created prerequisites for developing the efficient and economically feasible means of earthquake-resistant construction, i.e. various methods and devices of vibration control, to reduce seismic loads on buildings and constructions [*Arutyunyan*, 2010; *Torunbalci*, 2004]. The principles of passive control (seismic isolation of buildings from soil) are widely used in earthquake-resistant construction. Active monitoring apparatus, including real-time soil oscillation recording equipment, power drives to generate antiphased vibration of constructive units, and a control system, have also been developed for the important objects.

After publication of the GSZ-2012 map models, which were supposed to replace the GSZ-97 maps, they were widely discussed by the scientific community in Russia. These models were approved by the management of the Russian Academy of Sciences and Russian Gosstroy and adopted as norms for earthquake-resistant construction. Thereafter the maps of the general seismic zoning of the territory of the Russian Federation (including the territory of Crimea after 2014) were created as a result of the work on the improvement and updating of the above models. They were named the GSZ-2016 maps (see map in the figure). Responsible editors of the GSZ-2016 maps – Professor V.I. Ulomov (Shmidt Institute of Physics of the Earth, RAS) and M.I. Bogdanov (general director of the LLC “Institute of geotechnics and engineering research in construction”)

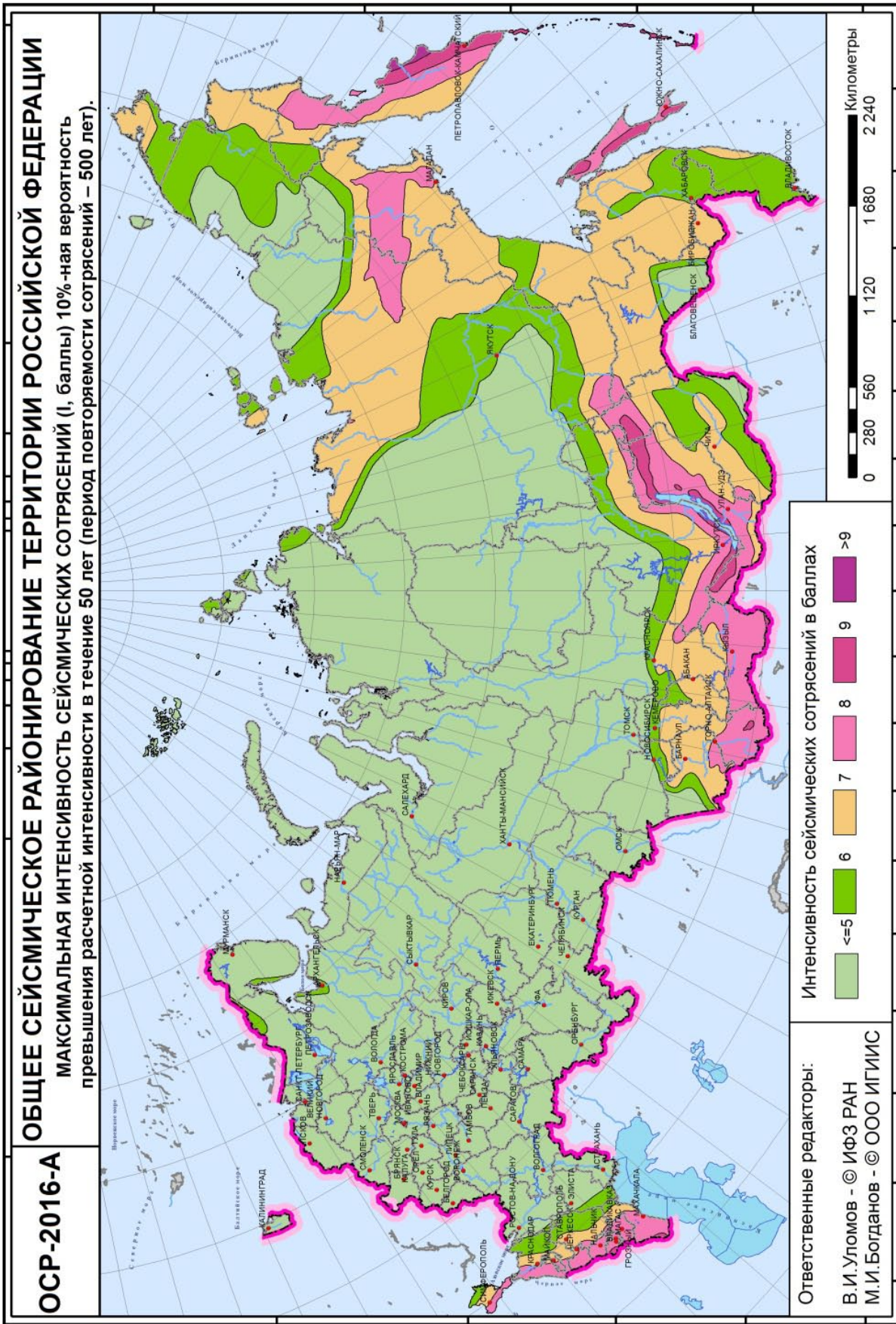
Various models of the seismic regime, including the probabilistic model successfully applied in the GSZ-97, were used when mapping

GSZ-2016 maps. The recommendations of the broadened meeting of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on seismology, held on 24.10.2013, were taken into account in the final version of the GSZ-2016 maps.

Detailed seismic and microseismic zoning takes into account local engineering and geological conditions (soil properties, groundwater level, etc.) and determine the amendments to the maximum intensity of seismic shocks on the GSZ maps. In this case, the value of the correction in the points does not exceed 0.5 as a rule.

The prediction of the time of a seismic event distinguished itself as a separate problem related both to the study of earthquake precursors (phenomenological approaches) and to the development of adequate models of a seismic source.

This problem remains one of the main challenges for the Earth sciences, and its fundamentality remarkably manifested in the discussion on the principal predictability or unpredictability of earthquakes initiated in the 1990s by R. Geller [*Geller*, 1991, 1996, 1997; *Geller et al.*, 1997]. During the discussion it has been noted that the prediction problem involves both scientific and socio-economic components [*Snieder*, *Van Eck*, 1997]. Social and economic aspects may change over time, that affects the assessment of predictions and their practical relevance. However, this is beyond the scope of this review. From the scientific point of view, it can be noted that criticism of earthquake precursors detection is based mainly on the experience of observing the anomalies of geophysical fields in Japan and Greece, in particular, based on the geodetic data and electrotelluric potentials (VAN method) [*Geller*, 1996]. But, the conclusion that there are no reliable precursors cannot be automatically transposed to all situations, including studies in other regions and the application of new methods. Doubts about the earthquake possibility have been aggravated due to the well-known provisions of nonlinear dynamics (divergence of phase trajectories, instability when the initial conditions change [*Koronovskii*, *Naimark*, 2012; *Koronovskiy et al.*, 2019]) and the concept of self-organized criticality (sometimes called third generation of synergy [*Malinetskiy*, *Podlazov*, 1997; *Bak*, *Tang*, 1989]). Appliance of this concept to the analysis of natural disasters has highlighted such unpredictable scenarios, as, for instance, the sand pile model (“heaps of sand”) [*Bak*, *Tang*, 1989].



GSZ-2016-A map of the general seismic zoning of the Russian Federation territory: maximum intensity of seismic shocks (in points) with a tolerance of 10% probability of exceedance of an estimated intensity within 50 years (occurrence frequency of earthquakes – 500 years) [General seismic..., 2016].

However, the hypothesis that the flow of seismic events corresponds to the models of self-organized criticality has not been proven. But there are known examples of explicit inconsistency of real seismicity with such models (precedents of successful earthquake predictions [Shebalin *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006; Tikhonov, Rodkin, 2012]).

Background: on earthquake predictions and precursors

The history of scientific research of the problem of earthquake precursors and prediction the events occurrence time covers more than half a century. This period is characterized, on the one hand, with an avalanche-like accumulation of data on the earthquake precursors, especially in the initial period (1960s–1970s) and, on the other hand, by a very limited possibility of their use in real prognosis.

An active searching and research of the earthquake precursors had begun with strong earthquakes in the beginning of the 20th century, which caused the death of people and entire cities. The earthquake in China (16.12.1920, $M = 7.8$), which left more than 200 thousand dead, is among the most terrible of them, in Japan (01.09.1923, $M = 8.3$), during which more than 100 thousand people have died. The catastrophic Ashgabat earthquake (06.10.1948, $M = 7.3$) in the territory of Turkmenistan completely destroyed the city and took the life of more than 100 thousand people.

The work on the organization of prognosis research began in many countries of the world, such as in Japan, the United States, the People's Republic of China, the former Soviet Union, after these devastating earthquakes. In the former USSR, the Ashgabat earthquake made the problem of predictions of such terrible natural phenomena one of the most urgent in the country. A research program on earthquake prediction was started under supervision of the Academician G.A. Gamburtsev. He was successful in creating such a comprehensive, well-thought-out and scientifically justified program that had not lost its importance as a guide to the implementation of practically meaningful earthquake prediction up to now [Pevnev, 2015]. Gamburtsev's main ideas about the status and prospects of the work on this problem were formulated in the paper [Gamburtsev, 1957], and subsequent publications (see: [Pevnev, 2015, 2016]).

The Gamburtsev program was based on the idea that the Earth's crust in the process of its evolution was divided into relatively strong blocks, which were separated by weakened zones – seismic joints (faults). The slow relative displacements of these blocks lead to the accumulation of shear stresses and their concentration at the certain points of a joint. Earthquakes occur in the points, where stresses exceed the ultimate strength.

The first worthy publications concerning this problem, according to [Zubkov, 2002], include studies of precursors by the movement of the Earth's crust [Reid (*ed.*), 1910; Meshcheryakov, 1968; Takagi *et al.*, 1984]; volcanic eruptions [Takagi *et al.*, 1984]; sea level [Rikitake, 1979]; groundwater level [Coble, 1965]; atmospheric electricity [Bonchkovskiy, 1954]; geoacoustic activity [Antsiferov, 1969]; seismic regime variations [Mamadaliyev, 1964; Keylis-Borok, Malinovskaya, 1966; Kosobokov, Rotvayn, 1977]; orientation of tension axes in the sources of weak earthquakes before a strong earthquake [Simbireva *et al.*, 1974]; discharge of groundwater sources [Smirnova, 1971]; geomagnetic precursors [Kato, Utashiro, 1949]; pulsed electromagnetic [Vorob'ev *et al.*, 1976; Gokhberg *et al.*, 1979]; meteorological [Rikitake, 1979]; gravitational [Fujii, 1966]; thermal [Ulomov, 1971; Mil'kis, 1986]; radon [Barsukov, 1970; Ulomov, Mavashev, 1971]; electrotelluric [Sobolev, Morozov, 1970].

At the second half of the XX – beginning of the XXI century, the state of the earthquake prediction problem has been discussed in the famous monographs: “Earthquake prediction” [Rikitake, 1979; Mogi, 1988], “Earthquake forecasting methods. Their application in Japan” [Takagi *et al.*, 1984], “Earthquake precursors” [Sidorin, 1992; Zubkov, 2002], “Fundamentals of earthquake forecasting” [Sobolev, 1993], “Middle-term earthquake prediction: fundamentals, method, realization” [Zav'yalov, 2006], “Methods of analysis of earthquake catalogues for the purposes of mid- and short-term predictions of strong seismic events” [Tikhonov, 2006].

Numerous results have been obtained, but no anomalies have been identified as the variations that can be recognized as unambiguous signatures of an expected strong earthquake. Variations of geophysical and other fields, which are hypothetical precursors, were recorded against the background noise accompanying the geode-

formation process [Zubkov, 2002; Kosobokov, 2005]. Under these conditions, there were variations in the same fields and in the aseismic period, conventionally called false alarms, in addition to the variations associated with the preparation of the earthquake source. This circumstance has been regarded as a failure of the prognosis in a number of works [Drumya, 1985; Gufeld *et al.*, 2011].

It gave rise to a skeptical conclusion about chosen incorrect strategy of solving the problem of the place prediction for preparing earthquake, which was formulated in the work [Pevnev, 2015]. This conclusion refers to the use of “methods of solving the inverse problems (image recognition) by the separate indirect signs – the anomalies in various fields: seismic, deformation, hydrogeological, geochemical, electromagnetic and many others” [Pevnev, 2015, p. 195] for prediction purposes. Alternative methods, i.e. the direct problem of detecting the location and time of an earthquake according to the signs that need to be developed during the formation of a source, require the development of adequate geomechanical models. But this problem seems to be even more difficult than earthquake prediction, and may take a long time to be resolved. Therefore, it is difficult to agree with the above conclusion, and the rapid improvement of the methods for solving the inverse problems allows a progress in the prognosis, and, possibly, one can expect practically important results (although predictions will remain probabilistic).

Catastrophic earthquakes at the end of the last century in China, Italy, Japan, Iran, USA (in California), Turkey and the former USSR in Spitak and Neftegorsk renewed interest in studying the problem of earthquake prediction [Kosobokov, 2005; Zav'yalov, 2006; Tikhonov, 2006].

In the US, the problem of earthquake prediction was raised in the mid-1960s. A number of conferences were held in collaboration with Japan, but no significant results were achieved until the foundation of the National Earthquake Hazards Reduction in 1977 [Scholz, 1997]. One of its tasks was to develop the methods for earthquake prediction and early warning systems.

The Parkfield experiment [Bakun *et al.*, 2005] was started in 1984. It was based on the quasi periodicity of earthquake occurrence at this

site of the San Andreas Fault (California, USA). And even that experiment did not allow to correctly predict the time of the next earthquake [Roeoffs, Langbein, 1994]. In 1990, the focus was shifted from the prognosis to the damage mitigation [Mervis, 1990]. In 1995, the National Academy of Sciences held a colloquium “Earthquake prediction: the scientific challenge”, which could not provide any new information for predictions [Knopoff, 1996].

In Japan, the earthquake prediction program began in 1964 [Bormann, 2011] by a five-year plan [Rikitake, 1966]. In 1978, the program focused on the prediction of an earthquake with $M > 8$. The area near Tokyo, where a devastating earthquake occurred on 01.09.1923, $M = 8.3$ was monitored for a long time. The main research of Japanese seismologists was concentrated at this small site until the earthquake in Kobe (17.01.1995, $M = 7.3$) had occurred. After 1994, Japan had sharply increased its seismological research funding, creating one of the densest networks of seismic and GPS stations (50–100 km distance between the stations). The data of this network were used [Tikhonov, Rodkin, 2012] for the mid-term prediction of the Tokachi-oki earthquake (26.09.2003, $M_w^* = 7.3$), which was justified partially. No predictions were made of this earthquake in Japan. Currently, the main efforts of Japanese seismologists are aimed at identifying the areas with irregularities (“asperities”, literally roughness [Kocharyan, 2016]) on the contacts of the plates. These irregularities, in their opinion, are a potential source of their «anchoring» and, therefore, a factor, which determines the subsequent accumulation of the stress level.

A catastrophic Tangshan earthquake (18.07.1976, $M = 7.3$) had occurred in China after a successful prediction of the earthquake in the vicinity of Haicheng (04.02.1975, $M = 7.3$). Tangshan earthquake did not manifest itself in a number of monitored precursors (foreshocks, etc.). Following Japan and the United States, China develops the networks of seismological and geophysical stations to study the physical fields of seismic zones. A great earthquake in China's Sichuan Province in 2013 stimulated the decision to invest more than \$300 million in earthquake predictions in order to develop a network of 5000 observation stations in the most danger-

* Magnitude designations in the review correspond to their designations in the sources.

ous areas of the country to provide early warning of a strong earthquake (<https://www.epochtimes.ru/kitaj-sozdast-sistemu-ekstrennogoopoveshheniyao-zemletryaseniyah-99035049/#/>).

In Russia, in the 1990s, after the collapse of the USSR and the actual cessation of funding for scientific research, the complex studies of seismically active regions were significantly reduced (the geophysical polygons at Garm and Talgar have been lost together with some collected data). This has led to the fading of interest in the study of straining process in the zone of future earthquake. So, the approach to the earthquake prediction were focused mostly on the search for the indirect geophysical precursors and statistical analysis of the regularities of the seismic regime [Sobolev, Morozov, 1970; Kossobokov et al., 1990; Sobolev, 2003; Rogozhin et al., 2011; Sobolev et al., 1991]. Either the areas of seismic calm [Ruzhich, 1996] or, conversely, the areas of increased seismicity concentration [Zav'yalov, 1986] are searched for.

Classification of earthquake predictions and precursors

The great amount of accumulated material on earthquake precursors has been systemized to some extent, and there are several classifications of precursors now. In 2011, E.A. Rogozhin at the conference “Earthquake prediction: are Russia and the World ready for them?”, said that the weakness of studying the precursors is that there is no special service in our country that would comprehensively monitor all the precursors. Under these conditions, all existing classifications of precursors, as well as types of prediction, are somewhat conventional.

Depending on the time of precursor appearance, the predictions are divided into long-term, mid-term and short-term. It should be noted that in practice such a division is rather conventional, especially in the case of short and mid-term precursors.

Long-term prediction is based on the peculiarities of geodynamic processes in the region, manifesting as change in the stress-strain state of the Earth's crust and associated changes in the seismic regime (such as the appearance of zones of seismic quiescence and variations of the transmitted seismic waves). Long-term sign of the earthquake source preparation may also

be the consolidation of crustal blocks and related increase of correlation radius of seismic events. As mentioned, the seismic zoning actually acts as long-term prediction of the location and strength of an earthquake.

Mid-term prediction gives an opportunity to receive a warning of a seismic event from a few weeks or months to several years. This prediction level assumes a scenario of the destruction process development in accordance with the data of seismological monitoring, as well as current observations of geophysical fields, change in the slopes of the Earth's surface, monitoring observations of the discharge and chemical composition of water sources and deep water, oil and gas wells. Formal criteria are used in assessing the statistical significance of each of the possible precursors and their complex.

The fundamentals for the mid-term precursors concept are the models describing significant increase in plastic deformation (in particular, dilatancy, i.e. volume increase at shear deformation) in the place of a future source and in surrounding zone. The most well-known models are the stick-slip, avalanche unstable fracturing formation and the dilatant-diffusion models [Sobolev, 1993; Scholz, 2002]. The relationship between the source size and the distance, at which precursors can appear, is analyzed in the summary [Dobrovolskiy, 1991]. This work proposes the consolidation source model and quantitative assessments have been obtained on its basis. In this case, phenomenological relationships, which are later used for estimating the place and magnitude of the expected earthquake, are established between the parameters of precursors and earthquakes [Drumya, 1985; Morgunov, 1999; Tikhonov, Rodkin, 2012]. But the time of the event is predicted within a characteristic interval of up to several years. Mid-term predictions provide an opportunity to refine the time estimates of the event, i.e. for a multistep prediction based on additional data for the selected “alarming” region (see below).

Short-term prediction is that with a lead time of several days to several weeks before the event. It is believed that the methods described above may still be valid [Drumya, 1985; Morgunov, 1999]. At the same time, the activation of the process of changing the strain-stress state (in particular, the foreshock series) becomes particularly

significant. Various short-term precursors, such as seismological, electromagnetic, hydrogeochemical, etc (depending on the observation method, see below) are based on the specialized physical models, general model of their occurrence can hardly be developed. For example, the widely held seismoelectric interconnection model [Hayakawa, Molchanov (eds), 2002] explains the excitation of the electromagnetic field before an earthquake with separating the charges on a contact surface along which a seismic movement will occur.

It is the short-term prediction that was the focus of the discussion about the possibility or impossibility of the earthquake prognosis according to the precursors observed [Sobolev, 1993]. The argumentation for the practical impossibility of short-term prediction was presented in the works [Koronovskii, Naimark, 2012; Koronovsky et al., 2019; Geller, 1997; Geller et al., 1997; Gufeld et al., 2011; Snieder, van Eck, 1997]. But there are also works with encouraging results on short-term predictions [Morgunov, 1999; Gavrilov, 2007; Shchekotov et al., 2015; Tikhonov et al., 2017; Hayakawa et al., 1996; Rozhnoi et al., 2009].

Ultrashort-term (operational) prediction with a lead time of several seconds to several hours is considered in some works as an extreme case of short-term predictions [Parovyshny et al., 2015]. Actually, the approaches to operational prediction solve the same problem as the methods of early detection of movements in the seismic source. Ultrashort-term prediction are relevant due to the conclusions of nonlinear dynamics about the presence of «prognosis horizon», beyond which deterministic description of behavior of complex dynamic systems is impossible [Malinetskiy, Podlazov, 1997]. For the areas of earthquake sources beyond the prediction horizon, there may be the time lag before the event of about a week, as in short-term predictions [Koronovskii, Naimark, 2012]. At the same time, mid-term predictions do not reflect the approaching of the fracture itself, but the related synchronous processes.

The methods, on the basis of which earthquake precursors are studied, are usually divided into geological, geophysical, hydrogeochemical, biological, geomechanical, seismological and biophysical.

Geological methods are used in studying the faults, and rock fracturing as one of the factors

that determine the possible location of the future earthquake.

Geophysical methods estimate density, electrical conductivity, magnetic susceptibility, P and S waves velocities, change in the intensity of electrotelluric and geomagnetic fields, etc. A special group of geophysical methods are ionospheric ones [Buchachenko et al., 1996; Molchanov, Hayakawa, 2007] which analyze changes in the total electronic content, the parameters of transmitted radio waves and other variations before earthquakes.

Hydrogeochemical methods are based on the measurement of chemical elements in groundwaters and borehole waters. The content of radon, helium, fluorine, silica and other elements is determined. Their concentrations may be used as the most typical precursors of the earthquakes coming.

Geomechanical precursors are related to rock deformation, movement of blocks and megablocks in seismic regions.

Seismological methods for identifying the precursors include determination of the ratio of velocities of P and S waves, amplitude ratios of different wave types, determination of absorption and dispersion coefficients, calculation of micro-earthquake frequency, identification of zones of temporal activity and quiescence. It would be natural to include in the same group of precursors more complex parameters, which are calculated using seismological data: parameter of seismogenic faults K_{cp} [Zav'yalov, 2006], characteristics of correlations with the phases of lunar-solar tides [Saltykov, 2016], low-frequency seismic noise ordering parameters [Lyubushin, 2011] etc.

Biological and biophysical precursors are associated with unusual animal behavior, which is believed to be caused by change in geophysical fields. These precursors suggest change in the biosphere (in particular, in the behavior of some objects) by anomalies in the Earth's geophysical fields prior to an earthquake. An example of such anomalies is the characteristics of a natural electric field in the atmosphere. The question about the reliability for biophysical (biological) precursors is even more controversial than for others.

The following series of seismological parameters are distinguished in terms of their importance:

- The parameter determined by the intersection of the compression axes in the sources of the

buried foreshocks and indicating the location of the source of preparing earthquake [Zakharova, Rogozhin, 2000, 2001, 2004];

- The parameter characterizing stress state of the medium by determining the Centroid Moment Tensor [Yunga, 1996, 1999];
- The RTL-parameter based on identifying the anomaly of seismic quiescence by three functions, which characterize a seismic regime: epicentral R , time T and energy L [Sobolev, Tyupkin, 1996, 1998];
- The parameters of earthquake flow used in the Magnitude 8 (M8) and Mendocino Scenario (MSc) algorithms [Kossobokov et al., 1990];
- The parameter S for the foreshock activation [Sobolev, 1993, 1999].

By means of a set of the most reliable long-, medium- and short-term seismological precursors, it is possible to monitor potential source zones and assess the operative situation in practice, as well to identify the periods of increased probability of earthquakes.

The “efficiency” of geophysical precursors is proved by the example of successful prediction of the 05.12.1997 Kronotsky earthquake with $M_w = 7.8$ [Zav'yalov, 2006]. This earthquake occurred in the Kamchatka region, which is well equipped with the systems of geophysical and geochemical observations for predictive indicators.

The work [Lyubushin, 2011] provides a mid-term assessment of the seismic hazard for most territory of Japan by the parameters of microseismic noise (triggered by the discharge of natural gases [Osika, 1981; Voytov, Dobrovol'skiy, 1994; Gufeld et al., 2010]). A.A. Lyubushin pointed out an increased probability of an earthquake in this area after 2010, i.e. on the eve of the 11.03.2011 Tohoku mega-earthquake with $M = 8.9-9.1$.

The series of successful mid-term predictions of Sakhalin earthquakes made by I.N. Tikhonov demonstrated an important example of effective methods used for the prognosis. The mid-term earthquake prediction on the southwestern shelf of Sakhalin was made using the seismic quiescence method (detection of a seismic gap of the second kind) in 2006. This prognosis was realized in the 02.08.2007 Nevelsk earthquake with $M = 6.2$ [Tikhonov, Kim, 2010]. Also, the predictions were given for the Takoya earthquake swarm in July-September, 2001, with the strongest event on 01.09.2001 with $M = 5.6$ [Tikhonov, 2001, 2002], and the 26.09.2003 Tokachi-oki earthquake with

$M = 8.0$, $M_w = 7.3$ near Hokkaido Island, Japan [Tikhonov, 2006; Tikhonov, Rodkin, 2012].

In the case of the 02.08.2007 Nevelsk earthquake, I.N. Tikhonov has managed to make a successful short-term prediction based on the approaches of B. Voight and D. Varnes, and on the model of self-developing processes by A.I. Malyshchev (close to the description of “blow-up regimes” in the concept of synergy). In all these approaches, the rapid, explosive increase of foreshock activity is considered a short-term precursor of an earthquake.

The retrospective modeling of weak ($M \sim 2.0-3.0$) series of shallow-focus earthquakes in southern Sakhalin during the period of 2003–2014 was performed later in the summary [Tikhonov et al., 2017], using the method of self-developing processes based on the data of local network catalogue. Mathematical models of nonlinear increase of the accumulation of the shocks number before strong ($M = 4.6-6.2$) events were constructed. Short-term predictions of T_0 parameter (time of strong shock occurrence) were obtained with a high degree of accuracy. Stability of obtained solutions when varying the duration of processing window of the data from a catalogue was shown. It is important for further research that in the summary [Tikhonov et al., 2017] the predictions were formulated and tested; the technical requests of the Sakhalin Branch of the Russian Expert Council on Emergency Situations were taken into account. These requests to lead time and magnitude interval are somewhat softer than those, which has been put forward during the hopefulness period of the XX century and are still often cited when criticizing the prognosis (this means that the wider intervals of lead time and magnitude of the predicting event were allowable). If we use «practical», albeit compromise requirements for assessing the predictions by I.N. Tikhonov, we can notice that they fully satisfy the principle of verification of hypothetical prognosis of earthquakes, like fully described in the works [Evison, Rhoades, 1993, 1997].

The presence of several successful earthquake predictions in the southern Sakhalin and adjacent offshore can be attributed to a more or less homogeneous (compared to other seismic zones) distribution of the direction of main compression and tensile axes along the extended faults: West Sakhalin and Central Sakhalin ones [Tataurova, 2015; Sim et al., 2017, 2020]. In the cited works,

the result on ordering (less heterogeneity) was obtained using the data on structural and geomorphological, and seismological indicators of crustal stress state.

The regularity of the stress field is a favourable factor for the development of new methods (algorithms) of earthquake prediction or adaptation of existing ones. An illustrative example is the SeisASZ algorithm developed in the IMG FEB RAS [Zakupin, 2016] for the mid-term earthquake prediction by the anomaly of the LURR parameter (load to unload response ratio), which describes the difference in the increment of Benioff strain during the periods of two different phases of lunar tides [Yin, Yin, 1991; Lockner, Beeler, 1999; Yin et al., 2001]. The LURR parameter was introduced by A.V. Nikolaev when analyzing the trigger effect of lunar-solar tides [Nikolaev, 1994; Sobolev (ed.), 2000]. Chinese seismologists proposed to use anomalies of this ratio (a significant difference from the unit, i.e. the value corresponding to the elastic or viscoelastic medium) as an indicator for predictions [Yin et al., 1995]. The anomalous values of the LURR parameter, i.e. the significant difference in the response of the medium to the increase and the decrease of the load, indicate the stage of plastic deformation of the medium in the area of the expected earthquake, and the appearance of the zone of transcendental straining (on conventional curve of stress-strain characteristics) [Zakupin et al., 2020; Rebetkiy, 2021]. Actually, the transcendental mode of straining is a sign of the future earthquake. As the fracture approaches, plastic (or transcendental) deformation becomes localized, and the LURR parameter, calculated for a large spanning volume, returns to normal values. A.S. Zakupin has shown in his works, that strong earthquakes in Sakhalin occur in a period not exceeding 2 years after the completion of the anomaly of the LURR parameter [Zakupin, 2016, Zakupin et al., 2018]. Two zones, where earthquakes were predicted, had been identified in a real-time mode (not retrospectively) by means of SeisASZ algorithm. Later the following earthquakes occurred in these zones: 14.08.2016 Onor with $M_w = 5.8$ and 23.04.2017 Krylon with $M = 5.0$. Predicted values of time and magnitude corresponded to observed ones [Zakupin, Semenova, 2018]. At the meetings of the Sakhalin Branch of the Russian Expert Council on Emergency Situations both

predictions were considered as realized. Thus, this new method assisted to confirm the possibility of the earthquake prediction in the southern part of Sakhalin Island, which were mentioned earlier in the works of I.N. Tikhonov [Tikhonov, 2006, 2009; Tikhonov, Rodkin, 2012] as an amazing precedent for predictability. The LURR parameter can be considered an effective mid-term precursor.

With regard to ionospheric precursors, it is possible to mention the intermediate result – the development of a complex method of analysis of earthquake precursors at the Institute of Applied Geophysics (Roshydromet). This method uses satellite and ground-based measurements of the ionosphere total electron content, the temperature in the lower atmosphere and a number of other parameters for identifying the signs of coming shocks. It was possible to predict the time of the event with a lead time up to five days at this stage, but the place of the expected event in this case was considered known or reliably predicted by means of other methods. According to the statistics, about 60 % of these ionospheric forecasts are realized (Earthquake Forecasting Service, <https://ecoportal.su/news//70133.htmviewml>). May be, it is possible to improve this system for short-term predictions of strong earthquakes.

Specialists of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and the Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources in 2012 developed a method of active monitoring, which use powerful vibrational sources creating the disturbances with load amplitude up to 100 t. Such vibrational sources allow to obtain data on the structure of the Earth's crust and, in the future, to affect the sources of preparing earthquakes for controlled stress drop, i.e. initiate weak earthquakes and obtain predictive information on strong earthquake probability.

To complete the review of the approaches to earthquake predictions, let us list the known cases of advanced predictions of strong earthquakes ($M > 5.5$). They were later confirmed and therefore considered successful (see the table below). The table also provides some retrospective predictions that have been made in the late XX – early XXI and had a significant meaning, because they have demonstrated that the criticism of the reliability of the earthquake precursors [Geller, 1991, 1997] can be overcome or reduced significantly.

Although the number of successful real-time predictions is small, but it is obviously larger than that might have been randomly guessed. This means the inconsistency, or at least the limitation, of the ideas of the fundamental unpredictability of earthquakes. Most of the predictions presented in the table are mid-term. Short-term predictions of the Haicheng and Nevelsk earthquakes were made after the mid-term ones, i.e. as a refinement when multistep prognosis. Various seismological precursors were used for all 11 examples of successful earthquake predictions, they contributed

mainly to the real-time prediction. Prediction examples of Tokachi-oki, 2003, and Shikotan, 1994, earthquakes may indicate that M8 and MSc algorithms are working, although higher efficiency is highly desirable for practice.

The table shows the seismological prediction methods to be more effective than other ones, such as geophysical (including advanced ionospheric methods), geological, and hydrogeochemical. So, the statement looks incorrect that the development of modern seismic networks had not made progress in this field.

Table. Successful predictions of the earthquakes with a magnitude $M > 5.5$

Date	M	Name (local), country	Prognosis kind, prediction parameters. References
04.02.1975	7.3	The Haicheng earthquake, Haicheng, China	<i>Foreshock sequences and other anomalies.</i> Multistep prediction, including short-term one. For a long time, this earthquake was believed to be a unique precedent of prediction, as a result of which the alarms were timely raised, and the fact of saving people who left the buildings became obvious [Raleigh et al., 1977; Wang et al., 2006]
16.08.1976	7.2	The Songnan earthquake, China	<i>Foreshock sequences.</i> Multistep prediction as in the case of Haicheng [Raleigh et al., 1977; Jones et al., 1984]
29.05.1975	7.3	The Longling earthquake, China	<i>Foreshock sequences.</i> Successful predictions of the Songnan and Longling earthquake were overshadowed by the Haicheng event, because no alarm was raised in this case. They are important as a confirmation that Haicheng is not a unique case [Raleigh et al., 1977]
04.10.1994	8.1	The Shikotan earthquake, The South Kuril Islands earthquake, Russia	<i>Predicted using the M8 algorithm</i> in the Institute of Earthquake Prediction Theory RAS [Kossobokov et al., 1990] and, independently, in the IMGG FEB RAS [Tikhonov, Rodkin, 2012]
05.12.1997	7.7	The Kronotsky earthquake, Kamchatka, Russia	Retrospective [Zav'yalov, 2006]
25.09.2003	7.3	The Tokachi-oki earthquake, Hokkaido, Japan	Retrospective [Shebalin et al., 2004; Tikhonov, 2006; Tikhonov, Rodkin, 2012]
15.11.2006	8.3	The Simushir earthquake, Kuril-Okhotsk Region, Russia	Long-term [Fedotov, 2005] Retrospective [Tikhonov et al., 2008; Shebalin, 2006]
02.08.2007	6.1	The Nevelsk earthquake, Sakhalin, Russia	Mid-term prediction by appearance of <i>a seismic gap of the second kind</i> and short-term prediction by <i>increase of foreshock activity</i> [Levin et al., 2007a, 2007b; Tikhonov, 2009; Tikhonov, Kim, 2008, 2010]
11.03.2011	9.1	The Tohoku earthquake, Japan	Mid-term, by <i>the characteristics of seismic noise</i> [Lyubushin, 2011]
30.01.2016	7.2	The Jupanovsky earthquake, Kamchatka, Russia	<i>Seismological, geophysical and geochemical precursors.</i> Three predictions made by different authors in real-time are considered successful [Boldina, Kopylova, 2017; Larionov et al., 2017; Firstov et al., 2017; Gavrilov et al., 2020]
14.08.2016	5.8	The Onor earthquake, Sakhalin, Russia	Mid-term prediction by <i>the LURR parameter</i> [Zakupin et al., 2018]

Modern approaches to the problem of earthquake prediction

Despite many years of experience in using the data on various earthquake precursors, the problem of predicting the time of earthquake has not been accomplished yet. On the one hand, there is a great amount of material on the manifestation of various precursors and there are some successes, but on the other hand, a strong earthquake occurs unexpectedly in 90 % of cases. This result shows our understanding of the mechanism of earthquake generation to be far from the real natural process (here we must agree with the authors of the work [Bakun *et al.*, 2005]). Many models of the earthquake preparation process are borrowed from mechanics, and they do not take into account the features of the structure of seismogenic regions of the Earth's crust – the fault zones [Rebetskiy, 2008].

Thus, with all the abundance of observations made and analyzed, the location, time and magnitude of future disastrous earthquakes, even in well-studied regions, remain unexpected. However, it is necessary to obtain new, additional data. But what are kinds of them? The set of possible parameters in a multi-attribute factor can be varied and broadened up to infinity, but the scope of real possibilities makes it necessary to limit it somehow.

Many researchers propose their own way to study the problem of earthquake prediction.

Some of them [Goldin *et al.*, 2001] see the main scientific problem in the fact that the process of earthquake preparation (especially its different possible scenarios) is not sufficiently understood. The main purpose of the new stage of monitoring research is to obtain data in the focal zones. This data will also contribute to a better understanding of geodynamic processes, that end with an earthquake, and to the construction of the theory of the physics of focal zones.

Others [Pevnev, 2015] believe that attempts to solve the problem of earthquake prediction without using any model of the preparation and implementation of earthquakes, but by the methods of inverse problems (using the measurement and analysis of the heterogeneous anomalies in different geophysical and other fields) have been failed due to incorrect statement of the problems. And the work [Pevnev, 2016] presents the main provisions of the deformation model of preparation of the crustal earthquake source (which has

confirmed the rationality of the Gamburtsev's way to the crustal earthquake prediction), as well as the conclusions from this model. These conclusions bring to the statement that the study of the deformations of the Earth's surface by geodetic methods makes it possible to accurately predict the location of preparing earthquake, as well as to determine the maximum power (magnitude) to be generated. In order to realize this prediction, it is necessary to create a geodetic structure on a site of the seismogenic zone, which is chosen due to various reasons, that allows to determine the type of deformations of the ground surface on the study site with necessary accuracy. This implies to establish reliably the type of elastic bending of rocks in the case, when this section is in the process of preparing an earthquake source. The work also considers such problems as prediction the strength and time of an earthquake and suggests the ways to solve them.

According to [Kissin, 2013], earthquakes need to be considered as a system that is part of a larger one – the system of geodynamic processes. The study of this natural phenomenon requires a systematic approach in order to identify the most important causal relationships. Complex studies are required in two main fields to obtain the knowledge sufficient to make a practical prediction:

- geological medium, its structure, heterogeneity and strength properties, identification of areas subjected to seismic deformations;
- the nature of the stress-strain state of the geological medium; factors affecting it; tectonic stresses, their distribution and changes by strength and parameters.

The first field is studying the medium, its properties and topology with regard to development of formalized theories of an earthquake preparation. It allows obtaining a priori information necessary for separating a study object from the environment, as well as information on the structure of medium and study object – a zone of the source formation. According to the concept of the geophysical medium of M.A. Sadovsky [Sadovskiy, 1986], which is now generally recognized, the geological medium has a block hierarchical self-similar structure, which determines the ability of the medium to accumulate, redistribute, absorb and radiate energy. Such features of the medium structure determine the specifics of seismic processes [Sadovskiy, Pisarenko, 1991].

The geological medium is highly heterogeneous, that is determined by lithology, tectonics, and presence of two-phases (solid and fluid) [Kissin, 1997]. The lithological heterogeneity of the medium causes the stark differences in the mechanical and strength properties of the rocks in the area of the forming source, which can reach up to 2–3 orders of magnitude (for example, for the Young's modulus). Therefore, the seismic process and its preparation will have their own characteristics for the sources located in the deep parts of the thick sedimentary cover in comparison with ones in the consolidated crust represented by crystalline rocks.

In addition to the features of the structure of the geological medium (i.e. internal factors), the external impacts, which can serve as triggers for dynamic movement in the source, are also important for successful earthquake prediction [Sobolev, 2011 a, b]. Trigger effects should be taken into account due to the fact that, just before an earthquake, the rock mass is in a state close to unstable equilibrium, or in other words, in near-critical condition. In the case of near-critical conditions, significant deformations can occur at small stress variations, excited, in particular, by the external impacts [Sobolev, Ponomarev, 2003; Makarov et al., 2007; Gokhberg, Kolosnitsyn, 2010]. At the same time, the conditions are produced for more intensive seismo-electromagnetic, and may be geophysical, interrelations, in particular the electromagnetic anomalies [Molchanov, Hayakawa, 2007].

The reality of trigger effects and their important role in the seismic process was confirmed in experiments on the physical simulation of the effect on the earthquake source [Sadovskiy et al., 1981; Sobolev et al., 1995; Sobolev, Ponomarev, 2003; Kuksenko et al., 2003; Avagimov et al., 2011; Buchachenko, 2014; Mubassarova et al., 2014; Bogomolov et al., 2004]. With no external (trigger) impacts, the medium presence in a metastable equilibrium state can be very long term. The transition to the destruction of the medium continuity or slippage along the fault occurs after external impact, the delay is within the range typical for short- or mid-term predictions. Thus, the control of “triggers” can improve the predictability of earthquakes. It is possible that some of the prediction given in the table above have been successful just under the conditions of trigger effect on the source of the preparing earthquake.

The work [Panteleev, Naimark, 2014] presents a review of models of tectonic earthquake preparation based on the approaches from various subject areas: mechanics of straining solids, statistical physics, mathematical statistics, nonlinear physics. Special attention is paid to the ideology of developing the models through a prism of earthquake prediction. The power and weaknesses of existing models and current trends in their development are discussed. On the basis of the review, the authors have concluded that pessimism about the possibility of predicting a strong tectonic earthquake that has taken place in the scientific community at the turn of the 20th and 21st centuries is replaced by an optimistic prospecting due to new achievements in geomechanics, tectonophysics, geophysics, rock mechanics and other fields of science. The authors believe that new unique information for understanding the processes of strong earthquake preparation and development of formalized models using the approaches of mechanics of straining solids can be obtained from the development of the methods for reconstructing tectonic stresses of the seismically active areas of the Earth's crust [Rebetskiy, 2003, 2007a]; identification of a structure, activity degree of the Earth crust's fault zones [Seminskiy, 2009], as well as their activation mechanisms, including changes in the abyssal fluid regime [Sherman et al., 1999; Rodkin, Rundkvist, 2017]. The laboratory and field studies of the structure and mechanisms of deformation of inter-block contacts and faults taking the properties of their filler into account [Kocharyan, 2010; Kocharyan et al., 2011]; development of the methods of complex geophysical continuous borehole survey, that make it possible to track the change in the nature of the stress-strain state of the geological medium in the observation area [Gavrilov, 2007; Gavrilov et al., 2014, 2013] are also of great importance.

The work by Yu.L. Rebetskiy [Rebetskiy, 2008] considers the state of theories of earthquake prediction, results of natural stresses assessment and new model of a source. In particular, it is noted that many of the ideas about the process of earthquake preparation have come from the mechanics of the strength of construction materials and do not take into account the features of the structure of fault zones, which are the seismogenic domains of the Earth's crust.

According to [Rebetskiy, 2008], there is a need to talk about the faults as special geological objects, the development of which is predetermined by a set of mechanochemical processes occurring in them. These processes form a range of specific conditions of their deformation and determine the abnormal characteristics of different physical fields. Similar conclusions have been made in the works of other authors devoted to fault zones (see the references in the book [Kocharyan, 2016]).

Further, Rebetskiy proposes to develop the methods for monitoring natural stress state, which allow to obtain data on the total stress tensor in the Earth's crust and its changes (in particular, the data on stress drop in earthquake sources). Recently, the methods for reconstructing the stress field have been developed [Rebetskiy, 2003, 2007b; Angelier, 1989; Gintov, 2005]. It is necessary to estimate regularly the strength parameters of rock masses in their natural occurrences for the further development of these methods. The stresses are directly related to the destruction process and allow to give the most complete characteristic of the deformation process stage.

In the scope of analysis presented, the formation process of an abnormally extended brittle rupture (earthquake) appears as a random process depending on the combination of the areas with active mylonitization, dilatancy and metamorphism in the faults. The stresses acting in fault zones depend on the structural and compositional state of the rocks, that form them, the temperature field, the fluid regime of these zones and are determined by the regional tectonic of the Earth's crust. The geological medium is significantly heterogeneous (unlike construction materials), that "automatically" predetermines the heterogeneity of the stress field at different scale levels of averaging. As a result, the values of the components of the natural stress tensor significantly depend on the scale of averaging.

The data on stress drop in the sources of moderate earthquakes may be very important for assessing the state of faults in conditions of the stress field mosaicity [Sycheva, Bogomolov, 2016, 2020]. The decrease of stress drop level in the sources of earthquakes of the same magnitude as in the preceding period can be considered as a mid-term precursor one more. Its physical meaning is that the necessary geomechanical

condition for a strong earthquake is a lack of efficiency (compared to the usual aseismic period) of energy release and stress drop during earthquakes of low and medium magnitude. In order to test the hypothesis, a large amount of data on focal parameters (in particular, stress drop) is necessary, that became possible only in recent years [Sycheva *et al.*, 2020].

It is no doubt, that new models of the earthquake source and theoretical approaches to predictions (explaining the precursors) became the basis of new prediction methods and algorithms. But while this very non-trivial problem is at the development stage, the older but already valid methods of earthquake prediction, which were discussed in the previous section, retain their practical significance.

Foreseeing the next discussions of research prospects of earthquake predictions (including short-term ones) it is worth to cite words from the article: "At the time of Columbus, most experts asserted that one could not reach India by sailing from Europe to the west and that funds should not be wasted on such a folly" [Wyss *et al.*, 1997]. And we also want to add, that the western route to India was long and expensive, but Columbus expedition has justified the cost, after all. It is futile to refuse the scientific and social challenge of earthquake forecasting, even if one feels this goal to be unattainable.

Conclusion

A special resolution on earthquake research and predictability was adopted at the 35th General Assembly of the International Association for Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI), that was held in Cape Town in January 2009, which followed after many years of discussion on the possibility (impossibility) of earthquake prediction. In this resolution, IASPEI, recognizing the opportunities that recent events offer for studying the earthquakes, recommends the scientific community to support the research on earthquake prognosis and predictability, certification and comparative testing of forecast methods.

Materials presented in the review show that although the earthquake prediction problem is still far from being resolved, there is a notable progress in the studies on it. This is confirmed by the fact that successful mid-term predictions of the time and place of an earthquake (made not

retrospectively, but in real-time) are not already unique. Development of methods and approaches for short-term earthquake prediction remains a pressing challenge that may (or may not) have an effective solution. However, there is a reason to believe that the improvement of mid-term predictive methods will bring them closer to short-term ones due to reducing the lead time of an event to the adjacent range (about a month). This trend is evident for the mid-term predictions made during the past decade.

It is important for further studies that the presence of separate seismically hazardous zones, which “permit” such predictions, has been actually revealed. One of these zones is the southern part of Sakhalin Island, where the precedent of “predictability” of earthquakes with the magnitudes $M < 7$ was noted. In these zones, as well as in the adjacent regions, new studies of the geological structure of medium, its geomechanical properties, as well as seismic process patterns for the development and improvement of approaches to earthquake predictions are most promising.

References

1. Angelier J. **1989**. From orientation to magnitude in paleostress determinations using fault slip data. *J. of Structural Geology*, 11(1-2): 37–49. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90034-5](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90034-5)
2. Antsiferov M.S. **1969**. [On the opportunities of geoacoustic method for earthquake forecasting]. In: *Trudy vserossiyskogo simpoziuma po seismicheskomu rezhimu (3–7 iyunya 1968 g.)* [Proceedings of the All-Russian symposium on seismic regime (June 3–7, 1968)]. Novosibirsk, 2, p. 28–141. (In Russ.).
3. Arutyunyan A.R. **2010**. [Modern methods for seismic isolation of buildings and structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*, 3: 56–60. (In Russ.).
4. Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Okunev V.I. **2011**. Dynamics of energy exchange in model samples subjected to elastic and electromagnetic impacts. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 47(10): 919–925. <https://doi.org/10.1134/S1069351311100016>
5. Bak P., Tang C. **1989**. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B11): 15635–15637. <https://doi.org/10.1029/jb094ib11p15635>
6. Bakun W.H., Aagaard B., Dost B., Ellsworth W.L. et al. **2005**. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake. *Nature*, 437(7061): 969–974. <https://doi.org/10.1038/nature04067>
7. Barsukov O.M. **1970**. [On the connection between electrical resistance of rocks and tectonic processes]. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 1: 84–89. (In Russ.).
8. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Novikov V.A., Okunev V.I., Sychev V.N., Zakupin A.S. **2004**. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation. *Annals of Geophysics*, 47(1): 65–72. <https://doi.org/10.4401/ag-3259>
9. Boldina S.V., Kopylova G.N. **2017**. Effects of the January 30, 2016, Mw=7.2 Zhupanovsky earthquake on the water level variations in wells YuZ-5 and E-1 in Kamchatka. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 863–880. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321>
10. Bonchkovskiy V.F. **1954**. [Changes in the gradient of electrical potential in the atmosphere as a possible precursor of earthquakes]. *Trudy Geofizicheskogo instituta*, 25(152): 192–206. (In Russ.).
11. Bormann P. **2011**. From earthquake prediction research to time-variable seismic hazard assessment applications. *Pure Applied Geophysics*, 168(1-2): 329–366. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0114-0>
12. Buchachenko A.L. **2014**. Magnetoplasticity and the physics of earthquakes. Can a catastrophe be prevented? *Physics-Uspekhi*, 57: 92–98. <https://doi.org/10.3367/ufne.0184.201401e.0101>
13. Buchachenko A.L., Oraevskii V.N., Pokhotelov O.A., Sorokin V.M., Strakhov V.N., Chmyrev V.M. **1996**. Ionospheric precursors to earthquakes. *Physics-Uspekhi*, 39: 959–965.
14. Coble R.W. **1965**. The effects of the Alaskan earthquake of March 27, 1964, on ground water in Iowa. *Proceedings of the Iowa Academy of Science*, 72(1): 323–332. URL: <https://scholarworks.uni.edu/pias/vol72/iss1/48>
15. Dobrovolskiy I.P. **1991**. *Teoriya podgotovki tektonicheskogo zemletryaseniya* [The theory of tectonic earthquake preparation]. Moscow: IFZ RAN, 218 p. (In Russ.).
16. Drumya A.V. **1985**. [Earthquake: where, when, why?]. Ed. M.A. Sadovskiy. Kishinev: Shtiintsa, 196 p. (In Russ.).
17. Evison F.F., Rhoades D.A. **1993**. The precursory earthquake swarm in New Zealand: Hypothesis tests. *New Zealand J. of Geology and Geophysics*, 36(1): 51–60. <https://doi.org/10.1080/00288306.1993.9514553>
18. Evison F.F., Rhoades D.A. **1997**. The precursory earthquake swarm in New Zealand: Hypothesis tests. II. *New Zealand J. of Geology and Geophysics*, 40(4): 537–547. <https://doi.org/10.1080/00288306.1997.9514782>
19. Fedotov S.A. **2005**. *Dolgosrochnyy seismicheskyy prognoz dlya Kurilo-Kamchatskoy zony* [Long-term seismic forecast for the Kuril-Kamchatka zone]. M.: Nauka, 303 p. (In Russ.).
20. Firstov P.P., Makarov E.O., Glukhova I.P. **2017**. Peculiarities of subsoil gas dynamics before the M 7.2 Zhupanovo earthquake of January 30, 2016, Kamchatka. *Doklady Earth Sciences*, 472(2): 196–199. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17020015>
21. Fujii Y. **1966**. Gravity change in the shock area of Niigata earthquake, 16 Jun. 1964. *Zisin (J. of the Seismological Society of Japan. Ser. 2)*, 19(3): 202–216. https://doi.org/10.4294/zisin1948.19.3_200
22. Gamburtsev G.A. **1955**. [Status and prospects of works in the field of earthquake forecasting]. *Bull. Soveta po seismologii AN SSSR*, 1: 7–14. (In Russ.).
23. Gavrilov V.A. **2007**. Physical causes of diurnal variations in the geoacoustic emission level. *Doklady Earth Sciences*, 414: 638–641. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07040320>
24. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V., Morozova Yu.V. **2013**. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoacoustic emission of rocks. *Russian J. of Earth Science*, 13(1): 1–16. <https://doi.org/10.2205/2013es000527>

25. Gavrilov V.A., Pantelev I.A., Ryabinin G.V. **2014**. The physical basis of the effects caused by electromagnetic forcing in the intensity of geoaoustic processes. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 50(1): 87–101. <https://doi.org/10.1134/s1069351314010042>
26. Gavrilov V.A., Pantelev I.A., Descherevskii, Lander A.V., Morozova Yu.V., Buss Yu.Yu., Vlasov Yu.A. **2020**. Stress-strain state monitoring of the geological medium based on the multi-instrumental measurements in boreholes: Experience of research at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic testing site (Kamchatka, Russia). *Pure Applied Geophysics*, 177(1): 397–419. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02311-3>
27. Geller R.J. **1991**. Shake-up for earthquake prediction. *Nature*, 352: 275–276. <https://doi.org/10.1038/352275a0>
28. Geller R.J. **1996**. Debate on evaluation of the VAN Method: Editor's introduction. *Geophysical Research Letters*, 23(11): 1291–1293. <https://doi.org/10.1029/96gl00742>
29. Geller R. **1997**. Earthquake prediction: a critical review. *Geophysical J. International*, 131(3): 425–450. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1997.tb06588.x>
30. Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. **1997**. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275(5306): 1616–1616. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>
31. [General seismic zoning of the territory of the Russian Federation: Explanatory note to the set of the GSZ-2016 maps and list of the localities situated in seismically active zones]. **2016**. Eds V.I. Ulomov, M.I. Bogdanov. 73 p. (In Russ.). http://seismos-u.ifz.ru/documents/zapiska_OCP_2016.pdf
32. Gintov O.B. **2005**. *Polevaya tektonofizika i ee primeneniye pri izuchenii deformatsiy zemnoy kory Ukrainy [Field tectonophysics and its appliance when studying the deformation of the Earth's crust in Ukraine]*. Kiev: Feniks, 572 p.
33. Goldin S.V., Dyad'kov P.G., Dashevskiy Yu.A. **2001**. The South Baikal geodynamic testing ground: Strategy of earthquake prediction. *Russian Geology and Geophysics*, 42(10): 1484–1496. (In Russ.).
34. Gokhberg M.B., Kolosnitsyn N.I. **2010**. [Trigger mechanisms of earthquakes]. In: [Trigger effects in geosystems: Proceedings of the All-Russian alignment meeting, Moscow, June 22–24, 2010]. Moscow: GEOS, p. 52–61. (In Russ.).
35. Gokhberg M.B., Morgunov V.A., Aronov E.L. **1979**. On the high-frequency electromagnetic radiation associated with seismic activity. *Doklady AN SSSR*, 248(5): 1077–1081. (In Russ.).
36. Gufeld I.L., Afanasyev A.V., Afanasyeva V.V., Novoselov O.N. **2010**. Trigger effects of seismotectonic processes in a dynamically changing geological medium. *Doklady Earth Sciences*, 433(1): 901–905.
37. Gufeld I.L., Matveeva M.I., Novoselov O.N. **2011**. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2(4): 378–415. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2011-2-4-0051>
38. Hayakawa M., Molchanov O.A. (eds.) **2002**. *Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Tokyo: Terra Scientific Publ., 477 p.
39. Hayakawa M., Molchanov O.A., Ondoh T., Kawai E. **1996**. The precursory signature of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signal. *J. of Atmospheric Electricity*, 16(3): 247–257.
40. Jones L.M., Han W., Hauksson E., Jin A., Zhang Y., Luo Z. **1984**. Focal mechanisms and aftershock locations of the Songpan earthquakes of August 1976 in Sichuan, China. *Geophysical Research Letters*, 89(B9): 7697–7707. <https://doi.org/10.1029/jb089ib09p07697>
41. Kato Y., Utashiro Sh. **1949**. On the changes of the terrestrial magnetic field accompanying the great Nankaido earthquake of 1946. *Science Reports of Tohoku University, Japan. Ser. 5*, 1: 40.
42. Keylis-Borok V.I., Malinovskaya L.N. **1966**. [On one pattern in strong earthquake occurrence]. In: [Seismological research methods]. Moscow: Nauka, p. 88–97. (In Russ.).
43. Kissin I.G. **1997**. Middle and short-term precursors of earthquakes and their factors determining reliability. *J. Earthquake Prediction Research*, 6(3): 367–386.
44. Kissin I.G. **2013**. On the system approach in the problem of forecasting the earthquakes. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 49: 587–600. <https://doi.org/10.1134/s1069351313040058>
45. Knopoff L. **1996**. Earthquake prediction: The scientific challenge. *Proceedings of The National Academy of Science*, 93(9): 3719–3720. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.9.3719>
46. Kocharyan G.G. **2010**. Fault zone as a nonlinear mechanical system. *Fizicheskaya. Mezomekhanika*, 13(Spec. Iss.): 5–17. (In Russ.). EDN: NQXHWN
47. Kocharyan G.G. **2016**. *Geomechanics of faults*. Moscow: GEOS, 424 p. (In Russ.).
48. Kocharyan G.G., Markov V.K., Markov D.V., Pernik L.M. **2011**. Experimental research on deformation mechanisms of low-strength thin layers of geomaterials. *Fizicheskaya. Mezomekhanika*, 14(6): 63–70. (In Russ.).
49. Koronovskii N.V., Naimark A.A. **2012**. The unpredictability of earthquakes as the fundamental result of the nonlinearity of geodynamic systems. *Moscow University Geology Bull.*, 67(6): 323–331. <https://doi.org/10.3103/s0145875212060026>
50. Koronovsky N.V., Zakharov V.S., Naimark A.A. **2019**. The short-term forecast of earthquakes: reality, scientific perspective or the project-phantom? *Moscow University Bull. Series 4. Geology*, 3: 3–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-3-3-12>
51. Kosobokov V.G. **2005**. [Earthquake prediction and geodynamic processes. Pt 1. Earthquake prediction: fundamentals, realization, perspectives]. Moscow: GEOS, 172 p. (Vychislitel'naya Seismologiya; 36). (In Russ.).
52. Kosobokov V.G., Rotvayn I.M. **1977**. [Strong earthquake-prone areas recognition. VI. Magnitude $M > 7.0$]. In: *Raspoznavanie i spektral'nyy analiz v seysmologii [Recognition and spectral analysis in seismology]*. Moscow: Nauka, p. 3–18.
53. Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.W. **1990**. Localization of intermediate-term earthquake prediction. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(12): 19763–19772. <https://doi.org/10.1029/jb095ib12p19763>
54. Kuksenko V.S., Manzhikov B.Ts., Tilegenov K., Shatemiroy Zh.K., Émil'bekov B.É. **2003**. Trigger effect of weak vibrations in solids (rocks). *Physics of the Solid State*, 45(12): 2287–2291. <https://doi.org/10.1134/1.1635499>
55. Larionov I.A., Marapulets Yu.V., Mishchenko M.A., Solodchuk A.A., Shcherbina A.O. **2017**. Research of the acoustic emission of the near-surface sedimentary rocks in Kamchatka. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 1(3): 57–63. (In Russ.). doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.057-063
56. Levin B.V., Satorova E.V., Kim Ch.U., Korovin M.E., Malashenko A.E., Savochkin P.V., Tikhonov I.N. **2007a**. The Sakhalin earthquake on August 17(18), 2006, and the first realization of integrated forecast. *Doklady Earth Sciences*, 412: 117–121. <https://doi.org/10.1134/s1028334x07010278>

57. Levin B.V., Kim Choon Oon, Tikhonov I.N. **2007b**. The Gornozavodsk earthquake of August 17(18), 2006, in the south of Sakhalin Island. *Russian J. of Pacific Geology*, 1(2): 194–199.
58. Lockner D.A., Beeler N.M. **1999**. Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B9): 20133–20151. <https://doi.org/10.1029/1999jb900205>
59. Lyubushin A.A. **2011**. Japan seismic catastrophe of 11 March, 2011: Long-term prediction by microseismic noise properties. *Geofizicheskie protsessy i biosfera*, 10(1): 9–35. (In Russ.). URL: https://alexeylyubushin.narod.ru/Long-term_prediction_of_JapanEQ_2011_by_microseisms_RUS.pdf
60. Makarov P.V., Smolin I.Yu., Stefanov Yu.P., Kuznetsov P.V., Trubitsyn A.A., Trubitsyna N.V., Voroshilov S.P., Voroshilov Ya.S. **2007**. [Nonlinear mechanics of geomaterials and geological mediums]. Novosibirsk: GEO, 235 p.
61. Malinetskiy G.G., Podlazov A.B. **1997**. [The paradigm of self-organized criticality. Hierarchy of models and limits of predictability]. *Izv. vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika = Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 5(5): 89–106. (In Russ.).
62. Mamadaliev Yu.A. **1964**. [On the study of seismic regime parameters in time and space]. In: [Problems of regional seismicity in Central Asia]. Frunze: Ilim, p. 93–104. (In Russ.).
63. Mervis J. **1990**. Earthquake scientists hope that recent rumblings will lead to more funding. *The Scientist*, April 2. <https://www.the-scientist.com/news/earthquake-scientists-hope-that-recent-rumblings-will-lead-to-more-funding-61400>
64. Meshcheryakov Yu.A. **1968**. [Studying the contemporary movements of the Earth's crust and the problem of earthquake forecasting]. In: [Contemporary movements of the Earth's crust]. Moscow: VINITI, 3, p. 44–62. (In Russ.).
65. Mil'kis M.R. **1986**. [Meteorological precursors of strong earthquakes]. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 3: 36–47. (In Russ.).
66. Mogi K. **1988**. *Earthquake prediction*. Transl. from Engl. (Academic Press, Tokyo, 1985). Moscow: Mir, 382 p. (In Russ.).
67. Molchanov O., Hayakawa M. **2007**. *Seismo-electromagnetics and related phenomena: History and latest results*. Tokyo: Terra Scientific Publ., 432 p.
68. Morgunov V.A. **1999**. [Realities of the earthquake forecast]. *Fizika Zemli*, 1: 79–91. (In Russ.).
69. Mubassarova V.A., Bogomolov L.M., Zakupin A.S., Panteleev I.A., Naymark O.B. **2014**. Strain localization peculiarities and distribution of acoustic emission sources in rock samples tested by uniaxial compression and exposed to electric pulses. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(4): 919–938. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2014-5-4-0163>
70. Nikolaev V.A. **1994**. [Spatio-temporal features of the strong earthquake relationship with tidal phases]. In: *Navedionnaya seismichnost' [Induced seismicity]*. Moscow: Nauka, 103–114. (In Russ.).
71. Osika D.G. **1981**. [Fluid regime of seismically active regions]. Moscow: Nauka, 201 p.
72. Panteleev I.A., Naimark O.B. **2014**. Modern trends in mechanics of tectonic earthquakes. *Perm Federal Research Center J.*, 3: 44–62. (In Russ.). EDN: TDURFP
73. Parovyshny V.A., Senachin V.N., Veselov O.V., Kocherigin E.V. **2015**. Temporal variations in geophysical fields and earthquake forecasting issues. *Geodynamics & Tectonophysics*, 6(1): 63–76. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0172>
74. Pevnev A.K. **2015**. Earthquake forecasting is possible. (On the place of geodetic research in solving the problem of earthquake forecasting). Pt 1. Grigory A. Gamburtsev and possibility of earthquake prediction. *Prostranstvo i Vremya = Space and Time*, 4(22): 195–201. (In Russ.).
75. Pevnev A.K. **2016**. Earthquake forecasting is possible. (On the place of geodetic research in solving the problem of earthquake forecasting). Pt 2. Back to Grigory A. Gamburtsev's theory: Deformation model for preparation of crustal earthquake source. *Prostranstvo i Vremya = Space and Time*, 1–2(23–24): 227–238. (In Russ.). URL: https://space-time.ru/space-time/article/view/2226-7271provr_st1_2-23_24.2016.91
76. Raleigh C.B., Bennett G., Craig H., Hanks T., Molnar P., Nur A., Savage J., Scholz C., Turner R., Wu F. **1977**. Prediction of the Haicheng earthquake. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 72: 236–272. <https://doi.org/10.1029/eo058i005p00236>
77. Rebetskiy Yu.L. **2003**. Development of the method of cataclastic analysis of shear fractures for tectonic stresses estimation. *Doklady Earth Sciences*, 388(1): 72–76. https://www.researchgate.net/publication/289231101_Development_of_the_method_of_cataclastic_analysis_of_shear_fractures_for_tectonic_stress_estimation
78. Rebetskiy Yu.L. **2007a**. Problems of earthquake prediction theory. Analysis of fundamentals from the perspective of a deterministic approach. *Geofizicheskiy zhurnal*, 29(4): 92–110.
79. Rebetskiy Yu.L. **2007b**. *Tectonic stresses and strength of rock masses*. Moscow: Akademkniga, 406 p.
80. Rebetskiy Yu.L. **2008**. [Current state of earthquake prediction theory. Estimation results of natural stresses and new earthquake source model]. In: *Problemy tektonofiziki: K sorokaletiyu sozdaniya M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN*. Moscow: IFZ RAN, p. 359–395. (In Russ.).
81. Rebetskiy Yu.L. **2021**. Concerning the theory of LURR based deterministic earthquake prediction. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 5(3): 192–222. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/grtz.2021.5.3.192-208.208-222>
82. Reid H.F. (ed.) **1910**. *The California earthquake of April 18 1906*. Vol. 2. *The mechanisms of the earthquake*. Washington: Carnegie Inst. Wash.
83. Rikitake T. **1966**. A five-year plan for earthquake prediction research in Japan. *Tectonophysics*, 3(1): 1–15. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(66\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(66)90021-7)
84. Rikitake T. **1979**. [Earthquake prediction]. Moscow: Mir, 388 p. (In Russ.).
85. Rodkin M.V., Rundkvist D.V. **2017**. *Geofluid geodynamics. Application to seismology, tectonics, ore and oil genesis processes*. Dolgoprudny: Intellect, 288 p. (In Russ.).
86. Roeloffs E., Langbein J. **1994**. The earthquake prediction experiment at Parkfield, California. *Reviews of Geophysics*, 32(3): 315–335. <https://doi.org/10.1029/94rg01114>
87. Rogozhin E.A., Ioganson L.I., Zav'yalov A.D. et al. **2011**. [Potential seismic sources and seismological earthquake precursors are the basis of a real seismic forecast]. Moscow: Svetoch Plyus, 368 p. (In Russ.). EDN: THIGTP
88. Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Schwingschuh K., Boudjada M., Biagi P.F., Maggipinto T., Castellana L., Ermini A., Hayakawa M. **2009**. Anomalies in VLF

- radio signals prior the Abruzzo earthquake ($M = 6,3$) on 6 April 2009. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 9: 1727–1732.
89. Ruzhich V.V. **1996**. [On the mid-term earthquake forecast in Pribaikal'e]. In: [*Geophysical studies in the Eastern Siberia at the turn of XXI century*]. Novosibirsk: Nauka, p. 143–147. (In Russ.).
 90. Sadvovskiy M.A. **1986**. [Self-similarity of geodynamic processes]. *Vestnik AN SSSR*, 8: 3–11. (In Russ.).
 91. Sadvovskiy M.A., Pisarenko V.F. **1991**. *Seismicheskiy protsess v blokovoy srede* [Seismic process in the block medium]. Moscow: Nauka, 96 p. (In Russ.).
 92. Sadvovskiy M.A., Mirzoev K.M., Negmatullaev S.Kh., Salomov N.G. **1981**. [Effect of mechanical vibrations on the character of plastic deformations of materials]. *Fizika Zemli*, 6: 32–42. (In Russ.).
 93. Saltykov V.A. **2016**. *Prilivnye efekty v vysokochastotnykh seismicheskikh shumakh v seismicheskom regione* [Tidal effects in the high-frequency seismic noises in seismic region]: [extended abstract of dr. sci. (phys. and math.) dissertation]. Moscow, MGU im. M.V. Lomonosova, 48 p. (In Russ.).
 94. Scholz C. **1997**. What ever happened to earthquake prediction? Reprint. with permission from *Geotimes*, vol. 17, March 1997. Copyright the American Geological Institute, 1997. URL: <https://earthquake.usgs.gov/learn/parkfield/scholz.html> (accessed 04.09.2022).
 95. Scholz C. **2002**. *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 496 p.
 96. Seminskiy K.Zh. **2009**. [Tectonophysical analysis of the internal structure of the fault zones]. In: *Modern Tectonophysics. Methods and Results: Materialy pervoy molodezhnoy shkoly-seminara* [Proceedings of the First Youth School-Seminar]. Moscow: IFZ RAN, 1, p. 258–276. (In Russ.).
 97. Shchekotov A.Yu., Chebrov V.N., Berseneva N.Yu. **2015**. [Electromagnetic precursors of the Olyutor and Sea of Okhotsk earthquakes]. In: *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii: Trudy 5 nauch.-tekhn. konf.: k 100-letiyu organizatsii instrumental'nykh seismologicheskikh nablyudeniya na Kamchatke, Petropavlovsk-Kamchatskiy*, 27 sent. – 3 okt. 2015 goda [Problems of the complex geophysical monitoring of the Russian Far East: Proceedings of the 5th Science and Technology Conference: on the centenary of arrangement of seismological observations in Kamchatka]. Petropavlovsk-Kamchatskiy: GS RAN, p. 311–315. (In Russ.).
 98. Shebalin P. **2006**. Increased correlation range of seismicity before large events manifested by earthquake chains. *Tectonophysics*, 424(3-4): 335–349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2006.03.040>
 99. Shebalin P., Keilis-Borok V., Zaliapin I., Uyeda S., Nagao T., Tsybin N. **2004**. Advance short-term prediction of the large Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003, $M=8.1$. A case history. *Earth, Planets and Space*, 56: 715–724. <https://doi.org/10.1186/bf03353080>
 100. Sherman S.I., Seminskiy K.Zh., Cheremnykh A.V. **1999**. Destruction zones and fault-block structures of Asia. *Tikhookeanskaya geologiya = Geology of the Pacific Ocean*, 18(2): 41–53. (In Russ.).
 101. Sidorin A.Ya. **1992**. [Earthquake precursors]. Moscow: Nauka, 192 p. (In Russ.).
 102. Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A. **2017**. Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(1): 181–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
 103. Sim L.A., Kamenev P.A., Bogomolov L.M. **2020**. New data on the latest stress state of the earth's crust on Sakhalin Island (based on structural and geomorphological indicators of tectonic stress). *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 372–383. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383>
 104. Simbireva I.G., Lukk A.A., Nersesov I.L. **1974**. [Change in the dynamic parameters of weak earthquake sources in the Garmskii district related to strong earthquake occurrence]. In: [*Regional studies of the seismic regime*]. Kishinev: Shtiintsa, p. 138–153. (In Russ.).
 105. Smirnova M.N. **1971**. [On the influence of weak earthquakes on the regime of Pyatigorsk mineral springs]. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 7: 80–83. (In Russ.).
 106. Snieder R., van Eck T. & van Eck T. **1997**. Earthquake prediction: a political problem? *Geologische Rundschau*, 86: 446–463. <https://doi.org/10.1007/s005310050153>
 107. Sobolev G.A. **1993**. *Osnovy prognoza zemletryaseniya* [Fundamentals of the earthquake prediction]. Moscow: Nauka, 313 p. (In Russ.). EDN: TGSIGH
 108. Sobolev G.A. **1999**. [Preparation stages of Kamchatka strong earthquakes]. *Volcanology and Seismology*, 4/5: 63–72. (In Russ.). EDN: RZYUFX
 109. Sobolev G.A. (ed.) **2000**. [Natural hazards of Russia. Seismic hazards]. Moscow: Kruk, 296 p. (In Russ.).
 110. Sobolev G.A. **2003**. [The prospects of earthquake forecasting]. In: *Problemy geofiziki XXI veka* [Problems of geophysics of the XXI century]. Moscow: Nauka, p. 158–178. (In Russ.).
 111. Sobolev G.A. **2011a**. *Kontseptsiya predskazuemosti zemletryaseniya na osnove dinamiki seismichnosti pri triggernom vozdeystvii* [The concept of predictability of the earthquakes based on the seismic dynamics under the trigger effect]. Moscow: IFZ RAN, 56 p. (In Russ.).
 112. Sobolev G.A. **2011b**. Seismicity dynamics and earthquake predictability. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 445–458. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-445-2011>
 113. Sobolev G.A., Morozov V.N. **1970**. [Local disturbances in the electric field on Kamchatka and their relation to earthquakes]. In: *Fizicheskie osnovaniya poiskov metodov prognoza zemletryaseniya* [Physical foundations for searching the methods of earthquake forecasting]. Moscow: Nauka, p. 110–121.
 114. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. **2003**. *Fizika zemletryaseniya i predvestniki* [Physics of the earthquakes and the precursors]. Moscow: Nauka, 270 p. (In Russ.).
 115. Sobolev G.A., Tyupkin Yu.S. **1996**. Low-seismicity precursors of large earthquakes in Kamchatka. *Volcanology and Seismology*, 18(4): 433–446.
 116. Sobolev G.A., Tyupkin Yu.S. **1999**. Precursory phases, seismicity precursors, and earthquake prediction in Kamchatka. *Volcanology and Seismology*, 20(6): 615–627.
 117. Sobolev G.A., Chelidze T.L., Zavyalov A.D., Slavina L.B., Nikoladze V.E. **1991**. Maps of expected earthquakes based on a combination of parameters. *Tectonophysics*, 193(4): 255–265. DOI:10.1016/0040-1951(91)90335-P
 118. Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Kol'tsov A.V. **1995**. Excitation of the oscillations in the seismic source model. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Fizika Zemli*, 12: 72–78. (In Russ.). EDN: QFFFDE
 119. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. **2016**. Patterns of stress drop in earthquakes of the Northern Tien Shan. *Russian*

- Geology and Geophysics*, 57(11): 1635–1645. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.009>
120. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. **2020**. On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 417–446. (In Russ.&Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416.417-446>
 121. Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Kuzikov S.I. **2020**. *Computational technologies in seismological research (on the example of KNET, Northern Tien Shan)*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN, 358 p. <https://dx.doi.org/10.30730/978-5-6040621-6-6.2020-2>
 122. Takagi A., Isibasi K., Suyekhiro S., Usami T., Matsuda T., Asada T., Yosii T., Vakita Kh., Sato Kh., Midzutani Kh. **1984**. *Metody prognoza zemletryaseny. Ikh primenenie v Yaponii [Earthquake prediction techniques. Their application in Japan]*. Moscow: Nedra, 287 p.
 123. Tataurova A.A. **2015**. Stress and strain fields based on data on crustal earthquake mechanisms in Sakhalin Island. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 3: 93–101. (In Russ.).
 124. Tikhonov I.N. **2001**. [On a long-term cyclicity of the strongest ($M > 7.5$) earthquakes in the area of the South Kuril Islands]. In: *Dinamika ochagovykh zon i prognozirovanie sil'nykh zemletryaseny severo-zapada Tikhogo okeana [Dynamics of the focal zones and the strongest earthquake prediction]*. Yuzhno-Sakhalinsk, 1, p. 23–33. (In Russ.).
 125. Tikhonov I.N. **2002**. A law of recurrence of the time spans between sequential seismic events. *Doklady Earth Sciences*, 387(2): 250–252. (In Russ.). EDN: PSYRMC
 126. Tikhonov I.N. **2006**. [Methods of analysis of earthquake catalogues for the purposes of mid- and short-term forecasts of strong seismic events]. Vladivostok; Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN, 214 p. (In Russ.).
 127. Tikhonov I.N. **2009**. Prediction of strong earthquake within the southwestern shelf of Sakhalin Island and its realization during the August 2, 2007, Nevel'sk earthquake. *Russian J. of Pacific Geology*, 3(5): 429–436. <https://doi.org/10.1134/s1819714009050042>
 128. Tikhonov I.N., Kim Ch.U. **2008**. A successful prediction of the Nevel'sk August 2, 2007, earthquake ($M_L=6.2$) in southern Sakhalin Island. *Doklady Earth Sciences*, 420(1): 704–708. <https://doi.org/10.1134/s1028334x08040417>
 129. Tikhonov I.N., Kim Ch.U. **2010**. Confirmed prediction of the 2 August 2007 M_w 6.2 Nevel'sk earthquake (Sakhalin Island, Russia). *Tectonophysics*, 485(1-4): 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.12.002>
 130. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. **2012**. The current state of art in earthquake prediction, typical precursors, and experience in earthquake forecasting at Sakhalin Island and surrounding areas. In: *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*, Ch. 5, p. 43–78. <https://doi.org/10.5772/28689>
 131. Tikhonov I.N., Vasilenko N.F., Levin Yu.N., Prytkov A.S., Frolov D.I. **2008**. [The 2006–2007 Simushir earthquakes as a new page in the history of Kuril seismically active zone]. In: *[Geophysical monitoring and problems of seismic safety of the Russian Far East]*: Trudy regional. nauch.-tekhn. konf. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 1, p. 215–219. (In Russ.).
 132. Tikhonov I.N., Mikhaylov V.I., Malyshev A.I. **2017**. Modeling the southern Sakhalin earthquake sequences preceding strong shocks for short-term prediction of their origin time. *Russian J. of Pacific Geology*, 11(1): 1–10. <https://doi.org/10.1134/s1819714017010092>
 133. Torunbalchi N. **2004**. Seismic isolation and energy dissipating systems in earthquake resistant design. In: *13th World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6*. Paper no. 3273. URL: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_3273.pdf
 134. Ulomov V.I. **1971**. *Attention! Earthquake!* Tashkent: Uzbekistan, 160 p. (In Russ.).
 135. Ulomov V.I., Mavashev B.Z. **1971**. [Precursors of the Tashkent earthquake]. In: *Tashkentskoe zemletryasenie 26 aprelya 1966 goda [The April 26, 1966 Tashkent earthquake]*. Tashkent: FAN Uzb. SSR, p. 188–192. (In Russ.).
 136. Vorob'ev A.A., Samokhvalov M.A., Gorelkin A.F. et al. **1976**. [Anomalous changes in the natural electromagnetic field intensity in the area of Tashkent prior the earthquake]. *Uzbekskiy geologicheskii zhurnal*, 2: 9–11. (In Russ.).
 137. Voytov G.I., Dobrovol'skiy I.P. **1994**. [Chemical and isotropic-carbohydrate instability of natural gas flows in the seismically active regions]. *Fizika Zemli*, 3: 20–31. (In Russ.).
 138. Wang K., Chen Q-F., Sun S., Wang A. **2006**. Predicting the 1975 Haicheng Earthquake. *Bull. of the Seismological Society of America*, 96(3): 757–795. <https://doi.org/10.1785/0120050191>
 139. Wyss M. et al. **1997**. Cannot earthquakes be predicted? *Science*, 278(5337): 487–490. <https://doi.org/10.1126/science.278.5337.487> https://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Cannot%20earthquakes%20be%20predicted%3F&journal=Science&volume=278&publication_year=1997&author=Aceves%20CRL&author=Park%20CSK (accessed 05.09/2022)
 140. Yin X., Yin C. **1991**. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction. *Science in China*, 34: 977–986.
 141. Yin X.C. et al. **1995**. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 145(3/4): 701–715. <https://doi.org/10.1007/bf00879596>
 142. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. **2001**. Development of a new approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 157: 2365–2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7_29
 143. Yunga S.L. **1996**. Retrospective analysis of temporal variations in seismic moment tensors in the Shikotan earthquake zone. In: *Federal system of seismological observations and earthquake prediction. Information and Analysis Bulletin*, 2(2): 24–40. (In Russ.).
 144. Yunga S.L. **1999**. Comparative analysis of seismotectonic deformations in regions of active geodynamic regimes. In: *Geophysics at the Century Boundary: Selected papers of scientists of the Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences*. Moscow: OIFZ RAN, p. 253–264. (In Russ.).
 145. Zakharova A.I., Rogozhin E.A. **2000**. [Strong earthquakes of the northwest Pacific margin and their deep-focus precursors]. *Vestnik OGGG RAN*, 2-1(12): 82–94. (In Russ.).
 146. Zakharova A.I., Rogozhin E.A. **2001**. Deep-focus precursors of strong earthquakes. *Doklady Earth Sciences*, 381A(9): 1122–1123.
 147. Zakharova A.I., Rogozhin E.A. **2004**. [Spatial-temporal ratios of strong earthquakes sources and their deep-focus precursors]. In: *[Geophysics researches (by the 75th anniversary of the Schmidt Institute of physics of the Earth)]*. Moscow: OIFZ RAN, p. 13–19. (In Russ.).

148. Zakupin A.S. **2016**. Program complex for the analysis of instability of seismic process. *Geoinformatika*, 1: 34–43. (In Russ.).
149. Zakupin A.S., Semenova E.P. **2018**. Study of the process of preparation of strong earthquakes ($M_w > 5$) on Sakhalin using the LURR method. *Vestnik KRAUNTS. Fiz.-mat. nauki = Bull. KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*, 5: 83–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98>
150. Zakupin A.S., Levin Yu.N., Boginskaya N.V., Zherdeva O.A. **2018**. Development of medium-term prediction methods: A case study of the August 14, 2016 Onor ($M = 5.8$) earthquake on Sakhalin. *Russian Geology and Geophysics*, 59(11): 1526–1532. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.012>
151. Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. **2020**. Application of methods of analysis of seismic sequences SDP and LURR for earthquake. *Geophysical Processes and Biosphere*, 19(1): 66–78. (In Russ.). <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4>
152. Zav'yalov A.D. **1986**. [Concentration criterion of seismogenic faults as a precursor of strong earthquakes]. *Volcanology and Seismology*, 3: 58–71.
153. Zav'yalov A.D. **2006**. [Middle-term earthquake prediction: fundamentals, method, realization]. Moscow: Nauka, 242 p. (In Russ.).
154. Zubkov S.I. **2002**. [Earthquake precursors]. Moscow: IFZ RAN, 140 p. (In Russ.).

Об авторах

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

Сычева Найля Абдулловна (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, nelya@ifz.ru

About the Authors

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

Sycheva, Nailia A. (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, nelya@ifz.ru

Поступила в редакцию 05.08.2022

После рецензирования 24.08.2022

Принята к публикации 28.08.2022

Received 05 August 2022

Revised 24 August 2022

Accepted 28 August 2022

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



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

УДК 551.234+550.4

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.183-194>
<https://www.elibrary.ru/gokikf>

Динамика физико-химических параметров термоминеральных вод Дагинского месторождения (до проведения реконструкции источников 2019–2020 гг.)

О. А. Никитенко*, В. В. Ершов, Р. В. Жарков, Г. В. Устюгов

*E-mail: nikitenko.olga@list.ru

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

Реферат. В работе представлены результаты исследований (2017 и 2019 гг.) физико-химических показателей термоминеральных вод Дагинского месторождения, полученные перед проведением реконструкции источников в 2019–2020 гг. Результаты были сопоставлены с данными исследований предыдущих лет (1958–2014 гг.) для изучения динамики измеряемых показателей во времени. Установлено, что воды Дагинского месторождения характеризуются постоянством химического состава и пластовых температур, рассчитанных по нескольким гидрохимическим геотермометрам, что свидетельствует о стабильном гидрогеологическом режиме месторождения. На протяжении многих лет сохраняется также пространственная гидрогеохимическая неоднородность в пределах месторождения, выраженная в различиях некоторых физико-химических показателей (поверхностные температуры, концентрации Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- и др.) термоминеральных вод, разгружаемых на разных участках (Северном, Центральном и Южном). Показано, что измерения содержаний микрокомпонентов (B , Br^- , Li^+) в исследуемых водах, выполненные в разных лабораториях (или разными методами химического анализа), могут существенно различаться. Наилучшие оценки пластовых температур Дагинского месторождения получены с помощью Na-K, K-Mg и SiO_2 гидрохимических геотермометров. Рассчитанные температуры составляют преимущественно от 60 до 100 °С, что соответствует глубине циркуляции термоминеральных вод около 2–3 км. Результаты данного исследования представляют основу для изучения дальнейшей динамики гидрогеохимических показателей Дагинского месторождения, в том числе после проведения мероприятий по реконструкции термоминеральных источников.

Ключевые слова: термоминеральные воды, химический состав, гидрохимические геотермометры, Сахалин

Dynamics of the physicochemical characteristics of the thermomineral waters of the Daginsky field (before the reconstruction of the springs in 2019–2020)

Olga A. Nikitenko*, Valery V. Ershov, Rafael V. Zharkov, Gennady V. Ustyugov

*E-mail: nikitenko.olga@list.ru

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

Abstract. The paper presents the results of studies (2017 and 2019) of the physicochemical characteristics of the thermomineral waters of the Daginsky field, obtained before the reconstruction of the springs in 2019–2020. The obtained data were compared with the data from the studies of previous years (1958–2014) in order to study the dynamics of the measured indicators in over time. It was found that the waters of the Daginsky field are characterized by the constancy of the chemical composition and reservoir temperatures calculated by means of hydrochemical geothermometers. This fact indicates a stable hydrogeological regime of the field. For many years, spatial hydrogeochemical heterogeneity has also been preserved within the field, which consists in the differences in some physicochemical indicators (surface temperatures, concentrations of Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , etc.) of the thermomineral waters discharged in different sites (Northern, Central, Southern). It is shown that the content of microcomponents (B , Br^- , Li^+) in the studied waters, which were measured in different laboratories (or with different methods of chemical analysis) can differ significantly. The most reliable estimates of reservoir temperatures of the Daginsky field are obtained using Na-K, K-Mg and SiO_2 hydrochemical geothermometers. The reservoir temperatures mainly range from 60 to 100 °C, which corresponds to a circulation depth of the thermomineral waters of about 2–3 km. These researches provide a basis for the studying the further dynamics of hydrogeochemical indicators of the Daginsky field, including after the reconstruction of the thermomineral springs.

Keywords: thermomineral waters, chemical composition, hydrochemical geothermometers, Sakhalin Island

Для цитирования: Никитенко О.А., Ершов В.В., Жарков Р.В., Устюгов Г.В. Динамика физико-химических параметров термоминеральных вод Дагинского месторождения (до проведения реконструкции источников 2019–2020 гг.). *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 3, с. 183–194. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.183-194>; <https://www.elibrary.ru/gokikf>

For citation: Nikitenko O.A., Ershov V.V., Zharkov R.V., Ustyugov G.V. Dynamics of the physicochemical characteristics of the thermomineral waters of the Duginsky field (before the reconstruction of the springs in 2019–2020). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 183–194. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.183-194>; <https://www.elibrary.ru/gokikf>

Введение

Подземные термоминеральные воды вызывают большой интерес исследователей из различных научных областей, поскольку гидротермы активно используются в качестве экологически чистого и возобновляемого источника энергии, гидроминеральных месторождений для получения редких металлов, а естественные области их разгрузки представляют собой уникальные объекты для создания рекреационных зон [1–10]. На территории Сахалинской области известны многочисленные выходы подземных термоминеральных вод. Одним из таких объектов является Дагинское месторождение термоминеральных вод, которое расположено в северной части о. Сахалин на побережье Ныйского залива Охотского моря. Здесь функционируют десятки высокодебитных горячих источников с температурой разгружаемых вод до 53 °С [11]. В пределах Дагинского месторождения установлен режим особо охраняемой природной территории – термоминеральные источники являются памятником природы регионального значения лечебно-оздоровительного профиля¹. Бальнеологическая ценность термоминеральных вод и высокий рекреационный потенциал данной территории, а также наличие в относительной близости углеводородных залежей обуславливают высокий интерес к проведению здесь гидрогеологических исследований [11–15].

Как правило, исследования Дагинских источников проводятся для того, чтобы получить инструментальные данные о поверхностных температурах, оценить пластовые температуры, дать общую гидрогеохимическую характеристику на момент отбора проб. Однако не менее важно, на наш взгляд, проводить систематизацию и сравнительный анализ физико-химических показателей термоминеральных

вод, полученных разными исследователями в разные периоды времени, начиная с 50-х годов XX в., когда были выполнены первые гидрогеохимические опробования на Дагинском месторождении. Это позволило бы изучить вариации физико-химических показателей термоминеральных источников во времени, а также установить закономерности их пространственных различий, поскольку известно, что источники, расположенные на разных участках месторождения – Северном, Центральном и Южном – имеют определенные различия в химическом составе разгружаемых вод [15]. Такое исследование представляется актуальным, потому что результаты реконструкции Дагинских источников с благоустройством территории вокруг них² в 2019–2020 гг. вызвали серьезный общественный резонанс³. В средствах массовой информации обсуждался вопрос о возможном нарушении режима водного питания источников после выполнения строительных работ, что могло послужить причиной наблюдаемого снижения температуры термоминеральных вод.

Цель настоящей работы – изложить результаты гидрогеохимических исследований, проведенных нами непосредственно перед благоустройством (реконструкцией) Дагинских источников, а также сопоставить их с результатами исследований предыдущих лет для изучения динамики измеряемых физико-химических показателей термоминеральных вод.

Объект и методы исследования

Область разгрузки Дагинских термоминеральных вод протягивается узкой полосой примерно на один километр в юго-западном направлении от литоральной зоны Ныйского залива. На территории Дагинского месторождения выделяют три участка: Южный, Цен-

¹ Государственный кадастр особо охраняемых природных территорий регионального значения Сахалинской области. 2021. Южно-Сахалинск, с. 861–862 [State cadastre of specially protected natural areas of regional importance of the Sakhalin region. 2021. Yuzhno-Sakhalinsk, 861–862 p.].

² Официальный сайт Губернатора и Правительства Сахалинской области [Official website of the Governor and the Government of the Sakhalin region]. URL: https://sakhalin.gov.ru/index.php?id=105&tx_ttnews%5D=16530&cHash=74db037beacf1d50215d2360448a0e54 (accessed 04.05.2022).

³ Информационное агентство «Сак.ком» [News agency "Sakh.com"]. URL: <https://sakhalin.info/news/183125> (accessed 20.04.2022).

тральный и Северный [15]. Источники Северного участка расположены непосредственно в приливно-отливной зоне и периодически затопляются морскими водами залива. Источники Центрального участка в основном сосредоточены в заболоченном понижении, которое в периоды весеннего снеготаяния и интенсивных дождей подтапливается пресными водами атмосферных осадков. Южный участок находится на некотором удалении от Центрального и Северного и представлен небольшой группой источников, часть из которых располагается в русле мелкого ручья. Морфологически термоминеральные источники представляют собой воронкообразные углубления диаметром от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров (рис. 1а). Всего на территории месторождения насчитывается более 60 источников [14]. При обустройстве минеральных источников обычно осуществляют каптаж – комплекс инженерно-технических мероприятий для изоляции минеральных вод от примеси поверхностных вод. Каптаж должен обеспечить максимальный дебит и напор подземных вод с сохранением их естественного состава и свойств. До проведения реконструкции 2019–2020 гг. наиболее крупные источники были каптированы подручными средствами, в основном дощатыми материалами, а их эксплуатация населением происходила путем принятия ванн «диким» образом. В настоящее время на территории месторождения в соответствии с реализованным проектом реконструкции специально оборудовано для принятия лечебно-оздоровительных ванн 6 источников (Молодость, Мечта, Патриот, Партизан, Центральный и Александровский) (рис. 1б, 2 б).

С позиции региональной тектоники Дагинское месторождение термоминеральных вод приурочено к восточной части Северо-Сахалинской наложенной впадины, в пределах которой развит одноименный артезианский бассейн [16, 17]. В геологическом строении бассейна принимают участие рыхлые литифицированные отложения четвертичного, плиоценового и миоценового возраста, общая мощность которых составляет 2–8 км. Фундамент бассейна представлен верхнемеловыми сильно литифицированными образованиями. Считается, что Дагинское месторождение тер-

моминеральных вод сформировано в отложениях нутовской свиты плиоценового возраста, состоящей из слоев водоупорных глин и водоносных песков. Район месторождения характеризуется наличием нескольких систем разрывных нарушений, что обеспечивает возможность вертикальной миграции термоминеральных подземных вод на земную поверхность. В Северо-Сахалинском артезианском бассейне прослеживается выраженная гидродинамическая и гидрохимическая зональность. В основной области водосбора развита зона свободного водообмена, где распространены пресные гидрокарбонатно-натриевые воды. Ближе к северной части бассейна в нижней части разреза – ниже плиоценового водоносного

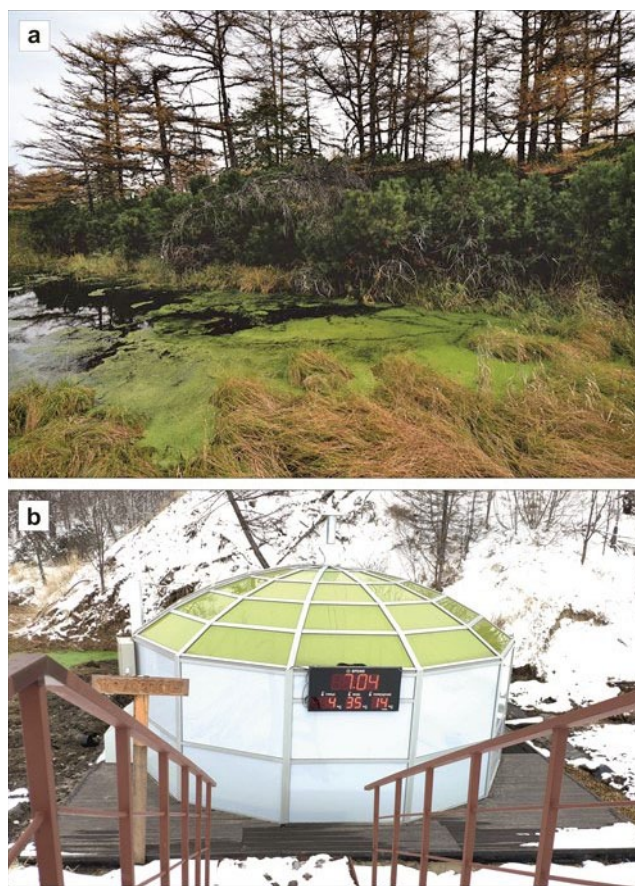


Рис. 1. Современное состояние некоторых термоминеральных источников Дагинского месторождения. (а) область разгрузки термоминеральных вод на одном из источников Центрального участка; (б) источник Молодость на Южном участке после проведения мероприятий по реконструкции в 2019–2020 гг. Фото О.А. Никитенко

Fig. 1. The current state of the some thermomineral springs of the Duginsky field. (a) the area of discharge of the thermomineral waters in the Central site; (b) Molodost' spring in the Southern site after reconstruction in 2019–2020. Photos by O.A. Nikitenko

комплекса – находится зона затрудненного водообмена, для которой характерны гидрокарбонатно-натриевые воды с минерализацией около 3 г/л. А на северной и восточной окраинах артезианского бассейна в гидрогеологическом разрезе преобладают подземные воды хлоридно-натриевого состава с минерализацией преимущественно от 12 до 28 г/л, зона же пресных и солоноватых вод здесь имеет сравнительно небольшую мощность [17].

Традиционно на территории Дагинского месторождения термоминеральных вод выделяют Дагинское грязевулканическое проявление на Северном участке, которое состоит из группы небольших грифонов высотой в основном не более 25–30 см [18]. Однако необ-

ходимо отметить, что причисление данного геологического объекта к грязевым вулканам является дискуссионным, поскольку было установлено, что по многим параметрам он не соответствует типичным проявлениям грязевого вулканизма [19].

Полевые исследования на Дагинских источниках проводились нами в период с 2017 по 2019 г., т.е. до мероприятий по их реконструкции. Отбор проб термоминеральных вод осуществлялся из разных источников и скважин, расположенных на Южном, Центральном и Северном участках (рис. 2), включая источники, которые в настоящее время реконструируются. Для опробованных источников определялись координаты с помощью системы GPS.

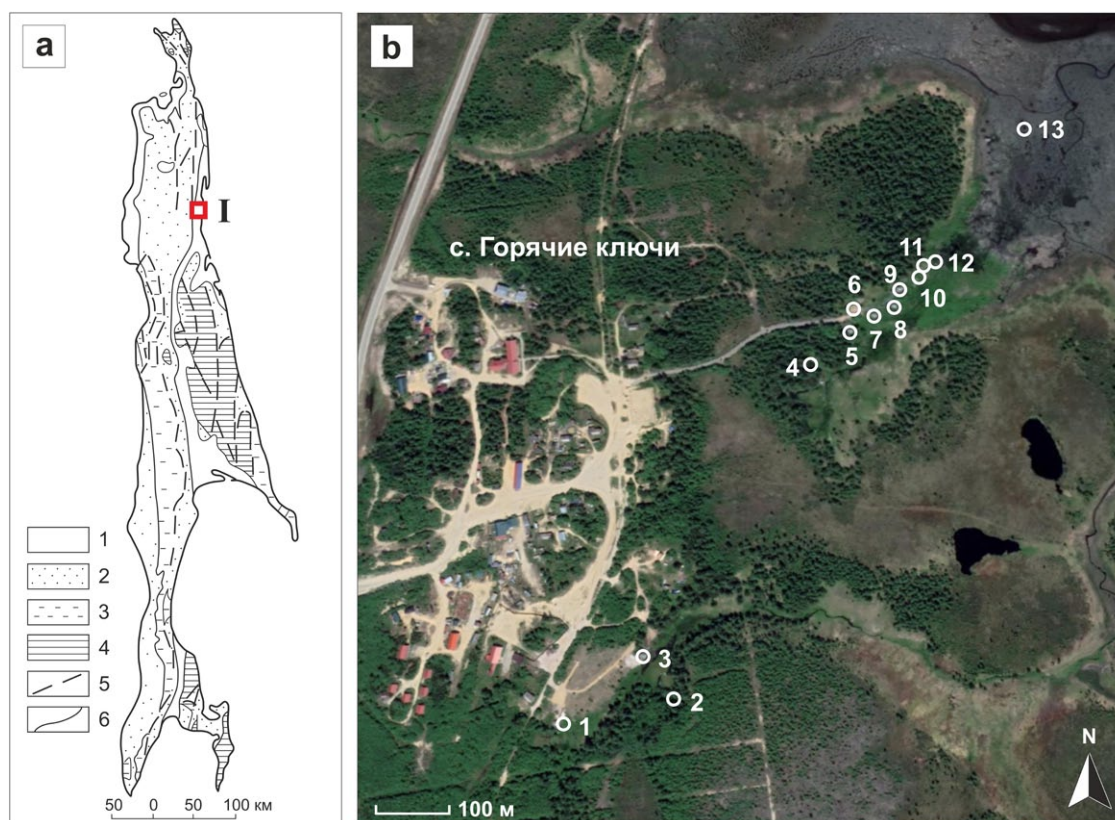


Рис. 2. Карта-схема района исследования. (а) геолого-тектонические условия о. Сахалин по [23]: 1 – седиментитовая четвертичная надформация, 2 – литолитовая палеоген-неогеновая надформация, 3 – метаобломочно-литолитовая меловая мегаформация метаморфитовой палеозой-мезозойской надформации, 4 – метаморфитовая палеозой-мезозойская надформация, 5 – основные разрывные дислокации; 6 – стратиграфические границы геологических формаций; I – местоположение Дагинского месторождения. (б) Схема расположения опробованных источников и скважин: Южный участок (1 – Молодость, 2 – Здоровье, 3 – Мечта); Центральный участок (4 – Озерный, 5 – Александровский, 6 – скважина № 4, 7 – Пионер, 8 – Партизан, 9 – Патриот, 10 – Питъевый, 11 – Стиральный, 12 – Трепанг); Северный участок (13 – Морской).

Fig. 2. Schematic map of the study area. (a) the geological and tectonic settings of Sakhalin Island are given according to [23]: 1 – Quaternary system, 2 – Paleogene-Neogene system, 3 – Cretaceous system, 4 – Paleozoic-Mesozoic system; 5 – main discontinuous dislocations; 6 – stratigraphic boundaries; I – the location of the Daginsky field. (b) Layout of the sampled springs and wells: Southern site (1 – Molodost', 2 – Zdorov'e, 3 – Mechta); Central site (4 – Ozernyi, 5 – Aleksandrovskii, 6 – well № 4, 7 – Pioner, 8 – Partizan, 9 – Patriot, 10 – Pit'evoi, 11 – Stiral'nyi, 12 – Trepanng); Northern site (13 – Morskoi).

Химико-аналитические исследования термоминеральных вод были выполнены в Центре коллективного пользования ИМГиГ ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск, Россия). Для исследуемых вод определялся водородный показатель с помощью рН-метра «3110 ProfiLine» (WTW, Германия). Основной ионный состав (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Li^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Br^-) определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе LC-20 Prominence (Shimadzu, Япония) с кондуктометрическим детектором. Концентрации HCO_3^- и CO_3^{2-} определяли титриметрическим методом с визуальной индикацией конечной точки титрования. Массовые концентрации кремния (мономерно-димерных форм) и бора измеряли фотометрическим методом на спектрофотометре УФ-1200 (ТМ «Эковью», Россия). В ходе полевых исследований для опробованных источников выполнялись также измерения поверхностных температур с помощью цифрового измерительного преобразователя AZ8803 Dual K Thermometer (диапазон рабочих температур от -50 до $+1300$ °С) с датчиком температуры КТХА 01.02-002-к1-И-Т310-3 (диапазон рабочих температур от -40 до $+1000$ °С). Оценки пластовых температур проводились по гидрогеохимическим геотермометрам – Na-K, K-Mg, Na-Li, Mg-Li, SiO_2 [20–22].

Результаты и обсуждение

Гидрогеохимические исследования Дагинского месторождения 2017–2019 гг. показали, что разгружаемые здесь термоминеральные воды по соотношению основных анионов и катионов относятся к Cl-Na типу. Величина общей минерализации в анализируемых водах варьирует от 1.3 до 11.1 г/л, уровень pH – от 6.8 до 7.9, поверхностные температуры – от 22 до 49 °С (табл. 1).

Наблюдаемая в пределах месторождения пространственная гидрогеохимическая неоднородность выражается в различиях измеренных нами некоторых физико-химических показателей источников на разных участках – Северном, Центральном и Южном. Воды источников Центрального и Южного участков имеют относительно низкую минерализацию, значения которой не превышают 2.6 г/л, тогда как минерализация вод на Северном участке достигает 11.1 г/л. По нашему мнению, это обусловлено существенным влиянием морских

вод на гидрогеологический режим Северного участка, который территориально расположен непосредственно в приливно-отливной зоне.

Различия термоминеральных вод на разных участках месторождения проявляются и в содержании определенных компонентов ионно-солевого состава. Воды источников Северного участка характеризуются более высокими значениями отношений K/Cl , Ca/Cl , Mg/Cl , SO_4/Cl , Cl/B , воды Южного и Центрального участков – более высокими значениями отношений Na/Cl , HCO_3/Cl , Si/Cl . Таким образом, воды источников Южного и Центрального участков относительно богаты Na^+ , HCO_3^- и Si , а воды Северного – K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} и B . Различия между источниками на трех участках месторождения проявляются и в поверхностных температурах изливаемых вод – для Северного участка они более низкие, что также обусловлено подмешиванием в источники холодных морских вод Ныйского залива.

Для оценки устойчивости во времени выявленных различий источников на разных участках Дагинского месторождения мы сравнили измеренные нами физико-химические показатели с результатами исследований предыдущих лет. Из табл. 2, в которой систематизированы как литературные, так и собственные гидрогеохимические данные, видно, что различия в химическом составе между термоминеральными водами на Северном, Центральном и Южном участках сохраняются на протяжении многих лет. Вместе с тем на каждом из этих участков наблюдаются различия между данными разных лет. Так, для вод источников Центрального и Северного участков в 1958–1959 гг. отмечена более высокая минерализация (в среднем 12.8 г/л), чем по результатам более поздних опробований (на уровне 2 г/л). Минерализация вод источников Северного участка в 1958–1959 гг. составляла в среднем 19.2 г/л, в то время как по результатам следующих опробований – не выше 11.1 г/л. Такие значительные вариации данных параметров во времени в пределах одного участка могут быть обусловлены разной степенью их смешения с морскими водами Ныйского залива на поверхности. По этой же причине в пределах Центрального и Северного участков в разные моменты времени наблюдается существенный разброс концентраций основных компонентов ионно-солевого состава, что особенно хорошо видно по содержанию Na^+ и Cl^- .

Особое внимание обращают на себя концентрации Br^- , B и Li^+ , которые в термоминеральных источниках в пределах одного участка могут различаться на порядок при разных опробованиях в период с 1958 по 2019 г. Например, в водах источников Южного участка среднее содержание Br^- варьирует от 3.3 до 49 мг/л, B – от 1.2 до 28 мг/л, Li^+ – от 0.02 до 0.2 мг/л (табл. 2). При этом влияние морских вод на этом участке наименьшее, а средние показатели общей минерализации практически не изменяются во времени – от 2183 до 2484 мг/л. Вариации минерализации во

времени на Центральном и Северном участках более существенные: 1784–12770 и 3909–19153 мг/л соответственно (табл. 2). Этим можно было бы попытаться объяснить наблюдаемые здесь вариации содержаний Br^- , B и Li^+ . Однако диапазон колебаний в концентрациях этих микрокомпонентов несоизмерим с диапазоном изменений общей минерализации вод. Например, содержание Br^- на Центральном участке колеблется в пределах от 2.9 до 77 мг/л (табл. 2).

Указанные вариации концентраций Br^- , B и Li^+ могут быть обусловлены аналити-

Таблица 1. Физико-химические показатели термоминеральных вод в 13 источниках Дагинского месторождения в 2017 г. (верхняя строка) и 2019 г. (нижняя)

Table 1. Physicochemical characteristics of the thermomineral waters in 13 springs of the Daginsky field in 2017 (top line) and 2019 (bottom line)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$T, ^\circ\text{C}$	37 38	26 27	37 37	31 35	40 42	49 47	40 40	42 39	41 40	35 н.о.	н.о. 32	30 н.о.	н.о. 22
pH	7.1 7.8	7.1 7.6	7.3 7.5	7.4 7.2	6.9 7.5	7.8 7.9	7.0 7.3	7.3 7.3	6.8 7.2	7.5 н.о.	н.о. 7.5	7.2 н.о.	н.о. 7.3
M	2074 2017	2317 2281	2228 2182	1509 1517	1381 1341	2291 2333	1643 1560	1770 1770	1635 1599	1661 н.о.	н.о. 2558	2129 н.о.	н.о. 11125
Na^+	689 709	780 792	746 756	509 525	460 464	770 815	550 540	595 614	546 549	571 н.о.	н.о. 885	732 н.о.	н.о. 3541
K^+	5.4 8.2	7.8 9.5	7.1 8.2	3.2 3.8	3.7 4.7	6.2 8.1	4.1 5.0	2.8 3.5	2.9 3.6	3.9 н.о.	н.о. 4.4	3.2 н.о.	н.о. 89
Ca^{2+}	22 23	24 24	26 27	18 22	22 23	18 20	22 25	26 29	25 27	27 н.о.	н.о. 49	35 н.о.	н.о. 183
Mg^{2+}	4.3 5.1	4.0 5.1	4.2 5.9	1.4 1.5	2.2 2.1	3.0 3.8	1.2 1.4	1.8 2.1	2.4 3.0	5.6 н.о.	н.о. 8.6	4.8 н.о.	н.о. 271
Cl^-	1064 996	1227 1162	1146 1096	770 760	720 681	1160 1149	872 816	954 930	884 837	873 н.о.	н.о. 1417	1225 н.о.	н.о. 6297
HCO_3^-	285 256	270 268	295 268	205 183	170 146	330 317	190 146	185 171	170 159	162 н.о.	н.о. 171	190 н.о.	н.о. 146
SO_4^{2-}	0.1 0.5	0.1 0.2	0.1 0.6	0.3 2.6	0.7 0.6	0.1 0.2	0.6 5.8	1.5 1.2	1.1 1.1	0.6 н.о.	н.о. 0.5	0.7 н.о.	н.о. 570
Si	н.о. 14	н.о. 15	н.о. 15	н.о. 16	н.о. 17	н.о. 15	н.о. 18	н.о. 15	н.о. 16	н.о. 14	н.о. 17	н.о. н.о.	н.о. 11
B	н.о. 2.2	н.о. 2.3	н.о. 2.2	н.о. 1.0	н.о. 0.6	н.о. 2.4	н.о. 0.7	н.о. 1.5	н.о. 1.2	н.о. 1.4	н.о. 2.7	н.о. н.о.	н.о. 3.6
Br^-	3.8 2.6	4.1 2.6	4.0 2.9	2.5 1.6	2.7 1.7	3.8 2.9	3.2 2.0	3.9 2.5	3.5 2.2	н.о. 2.3	н.о. 3.8	4.9 н.о.	н.о. 13.1
Li^+	0.008 0.02	0.007 0.03	0.008 0.03	0.005 0.01	0.005 0.02	0.005 0.03	0.003 0.02	0.002 0.01	0.001 0.01	н.о. 0.01	н.о. 0.02	0.002 н.о.	н.о. 0.04

Примечания. Концентрации компонентов, а также показатель общей минерализации (M) представлены в мг/л; н.о. – показатель не определялся. Термоминеральные источники и скважины: Южный участок (1 – Молодость, 2 – Здоровье, 3 – Мечта); Центральный участок (4 – Озерный, 5 – Александровский, 6 – скважина № 4, 7 – Пионер, 8 – Партизан, 9 – Патриот, 10 – Питьевой, 11 – Стиральный, 12 – Трепанг); Северный участок (13 – Морской). Номера источников совпадают с их номерами на рис. 2.

Notes. The concentrations of the components, as well as the total dissolved solids (M) are given in mg/l; n.o. – indicator was not measured. Thermomineral springs and wells: Southern site (1 – Molodost', 2 – Zdorov'e, 3 – Mechta); Central site (4 – Ozernyi, 5 – Aleksandrovskii, 6 – well № 4, 7 – Pioner, 8 – Partizan, 9 – Patriot, 10 – Pit'evoi, 11 – Stiral'nyi, 12 – Trepanng); Northern site (13 – Morskoi). Spring numbers are the same that in the Fig. 2.

ческими ошибками при определении этих микрокомпонентов. В частности, измерения концентраций Br⁻ в 1958–1959 гг. [24] проводились методом «мокрой» химии (окислением бромид-ионов гипохлоритом кальция), в котором селективность и погрешность измерений зависит от многих факторов – например, качества используемых химических реактивов или влияния матрицы пробы (т.е. наличия и концентраций в пробе других компонентов). В связи с этим отметим, что в работе [24] концентрация Br⁻ в термоминеральных водах Дагинских источников достигает 410 мг/л, тогда как в наших исследованиях, проведенных современными химико-аналитическими методами (высокоэффективная жидкостная хроматография), содержание Br⁻ не превышает 13.1 мг/л. Кроме того, можно сопоставить приводимые в работе [24] данные о химическом составе вод рек и озер с данными о химическом составе термоминеральных источников (те и другие используются для оценки перспектив нефтегазоносности Северного Сахалина). Согласно [24], концентрации Br⁻ в водах поверхностных водоемов и пластовых водах нефтегазовых месторождений большей частью соизмеримы. По данным [24], содержание Br⁻ в речных водах достигает 32 мг/л, а в пластовых водах, например, Паромайского месторождения – 75 мг/л.

Таблица 2. Сопоставление средних значений физико-химических показателей термоминеральных вод Дагинского месторождения, полученных в разные периоды наблюдений

Table 2. Comparison of the average values of the physicochemical characteristics of the thermomineral waters of the Darginsky field, obtained in different observation periods

Участок	Время опробования, годы (количество проб)	T, °C	pH	M	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Si	Br ⁻	B	Li ⁺
Южный	1958–1959 (5)	39	7.7	2315	774	33	4.2	991	461	461	1.7	н.о.	49	1.2	н.о.
	2004 (2)	33	7.1	2484	855	12	34	6.1	1250	305	1.7	1.0	5.7	28	н.о.
	2014 (4)	37	8.0	2303	803	7.8	25	6.1	1082	348	0	н.о.	29	2.6	0.2
	2017–2019 (6)	34	7.4	2183	745	7.7	24	4.8	1115	274	0.3	15	3.3	2.2	0.02
Центральный	1958–1959 (8)	31	7.8	12770	4483	199	170	7634	188	188	28	н.о.	77	6.1	н.о.
	2004 (2)	33	7.6	2036	701	8.2	31	5.2	1041	226	0.6	7.8	4.1	28	н.о.
	2014 (3)	44	7.9	2023	734	7.1	24	3.8	1015	211	0.6	н.о.	26	1.9	0.2
	2017–2019 (15)	39	7.3	1784	608	4.2	26	3.0	936	193	1.2	16	2.9	1.4	0.01
Северный	1958–1959 (6)	28	7.9	19153	5885	290	726	10545	157	1454	н.о.	н.о.	192	н.о.	н.о.
	2004 (2)	26	7.3	6915	2313	31	203	70	4058	138	67	1.5	15	20	н.о.
	2014 (2)	45	7.6	3909	1337	13	92	18	2253	166	9.1	н.о.	17	3.0	0.4
	2017–2019 (1)	22	7.3	11125	3541	89	183	271	6297	146	570	11	13	3.6	0.04

Примечания. Концентрации компонентов, а также показатель общей минерализации (M) приведены в мг/л; н.о. – показатель не определялся. По каждому участку представлены средние значения гидрохимических показателей. Данные 1958–1959 гг. приведены по [24, 15], 2004 и 2014 гг. – по [11, 12]. В работах [24, 15] для термоминеральных вод дана суммарная концентрация Na⁺ и K⁺.

Notes. The concentrations of the components, as well as the total dissolved solids (M) are given in mg/l. n.o. – indicator was not measured. For each site, the average values of hydrochemical indicators are showed. 1958–1959 data are from [24, 15], 2004 and 2014 data are from [11, 12]. Works [24, 15] contain information on the total Na⁺ and K⁺ concentrations for the thermomineral waters.

При этом общая минерализация у поверхностных вод на 2–3 порядка ниже, чем у пластовых [24]. Таким образом, концентрация Br^- в речных водах заметно превышает концентрации основных анионов и катионов, что представляется нам маловероятным. К тому же такая высокая концентрация Br^- свидетельствует о нарушении принципа электронейтральности в речных водах. Поэтому мы полагаем, что представленные в работе [24] результаты измерений содержания Br^- в термоминеральных водах Дагинского месторождения следует считать завышенными. По нашему мнению, это обусловлено ошибками в измерениях устаревшими на сегодняшний день методами химического анализа.

Для оценки предполагаемых различий в результатах химико-аналитических исследований термоминеральных вод разными методами химического анализа, в настоящей работе проведен анализ одной и той же пробы в трех лабораториях (табл. 3). Химико-аналитические исследования пробы из источника Морской (Северный участок) выполнены в аккредитованной лаборатории ОАО «Приморгеология» (г. Владивосток) по стандартным методикам [11], в Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой, а также авторами в Центре коллективного пользования ИМГиГ ДВО РАН методами высокоэффективной жидкостной хроматографии и спектрофотометрии. Сопоставление данных из разных лабораторий показало в целом достаточно высокую воспроизводимость результатов измерений. Однако существует большое расхождение между концентрациями Br^- и Li^+ ,

несмотря на то что все измерения проводились современными высокочувствительными методами химического анализа. Это также свидетельствует в пользу нашего предположения, что наблюдаемые во времени вариации содержания микрокомпонентов в пределах одного участка Дагинского месторождения могут быть обусловлены химико-аналитическими особенностями измерений. Учитывая все это, для получения корректных выводов необходимо использовать результаты, полученные современными методами химического анализа, обладающими высокой точностью, чувствительностью, селективностью, а также низким восприятием к матричному составу пробы. Для минимизации влияния компонентов матрицы калибровку прибора проводят по стандартным образцам, соответствующим матричному составу анализируемой пробы. Кроме того, при получении сомнительных результатов анализа стоит провести параллельные измерения определяемых компонентов разными методами химического анализа.

С помощью геохимических геотермометров: Na-K, K-Mg, Na-Li, Mg-Li, SiO_2 – для Дагинских термоминеральных источников были сделаны оценки пластовых температур [20–22]. Результаты расчетов показали некоторые различия температур, установленных по разным геотермометрам (рис. 3). Наиболее близкие значения пластовых температур были получены из расчетов по Na-K, K-Mg и SiO_2 геотермометрам. Температуры формирования термоминеральных вод, рассчитанные с помощью Na-K геотермометра, находятся в диапазоне от 85 до 100 °C, K-Mg геотермометра – от 60 до 70 °C, SiO_2 геотермометра – от 70 до 85 °C.

Таблица 3. Результаты химического анализа пробы вод из термального источника Морской в трех лабораториях

Table 3. Results of chemical analysis of water sample from the Morskoi thermal spring obtained in three laboratories

Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Br^-	B	Li^+
1829	21	159	24	3397	162	11	9.4	3.4	0.06
1852	18	149	30	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	3.8	0.07
2046	20	158	33	3605	153	6.1	<0.05	4.5	0.69

Примечания. Концентрации компонентов представлены в мг/л; н.о. – показатель не определялся. Анализы выполнены: первая строка – в Центре коллективного пользования ИМГиГ ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск); вторая – в Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток); третья – в Центральной лаборатории ОАО «Приморгеология» (г. Владивосток) – по данным [11].

Notes. The concentrations of the components, as well as the total dissolved solids (M) are given in mg/l, n.o. – indicator was not measured. Sample analyses were performed: first line – in the Center for Collective Use of the IMGG FEB RAS (Yuzhno-Sakhalinsk); second line – in the Analytical Center of the FEGI FEB RAS (Vladivostok); third line – the Central Laboratory of OJSC «Primorgeology» (Vladivostok) – according to [11].

Существенных различий между пластовыми температурами, рассчитанными по указанным геотермометрам, для источников Южного, Центрального и Северного участков не наблюдается. Исключением здесь выступают только две пробы с Северного участка, для которых по Na-K и SiO₂ геотермометрам были получены температуры, значительно отличающиеся от большинства расчетных значений, – 142 и 8 °С соответственно. Вероятно, такие вариации пластовых температур на данном участке месторождения обусловлены подмешиванием к термоминеральным водам холодных морских вод Ныйского залива, что приводит к нарушению равновесия в системе «вода–порода», т.е. использование указанных геотермометров в таких условиях некорректно. По Na-Li и Mg-Li геотермометрам в большинстве случаев также были получены некорректные результаты: отрицательные значения или очень низкие положительные значения пластовых температур (2–6 °С), т.е. значительно ниже инструментально измеренных значений поверхностных температур Дагинских источников (22–49 °С). Учитывая описанные выше существенные различия аналитических определений Li⁺, полученных разными методами, такие аномальные значения расчетных температур по Na-Li и Mg-Li геотермометрам неудивительны. Отметим, что при расчете средних значений пластовых температур для каждого участка (рис. 3) отрицательные значения из анализируемой выборки были исключены.

В соответствии с температурами, полученными по Na-K, K-Mg и SiO₂ геотермометрам, и геотермическим градиентом на исследуемой территории, равным 33.2 °С [25], глубина циркуляции термоминеральных вод Дагинского месторождения составляет около 2–3 км. Существенных различий между температурами формирования термоминеральных вод в период с 2004 по 2019 г. не наблюдалось. Соответственно, можно говорить о неизменности глубин, с которых осуществляется разгрузка термоминеральных вод, что дополнительно указывает на стабильность гидрогеологического режима Дагинского месторождения в этот промежуток времени.

Заключение

В работе получены и проанализированы новые данные о физико-химических показателях термоминеральных вод Дагинского месторождения, полученные в 2017 и 2019 гг., т.е. непосредственно перед проведением в 2019–2020 гг. мероприятий по реконструкции источников и облагораживанию прилегающей территории. Сопоставление данных результатов с результатами исследований предыдущих лет, представленными в литературе, позволило оценить динамику измеряемых показателей во времени.

Совокупность проанализированных данных свидетельствует о том, что термоминеральные воды Дагинского месторождения в период с 1958 по 2019 г. характеризуются достаточно высокой стабильностью химического состава.

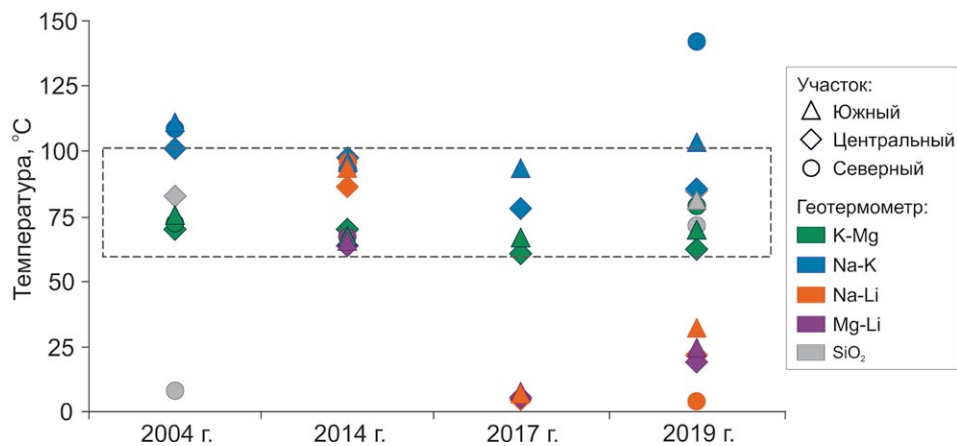


Рис. 3. Оценки средних значений пластовых температур для каждого участка Дагинского месторождения в разные годы по гидрохимическим геотермометрам. Пунктиром выделен диапазон температур, в котором группируется большинство полученных расчетных значений.

Fig. 3. Estimates of average formation temperatures in different years for each site of the Daginsky field using hydrochemical geothermometers. The temperature range in which most of the calculated values are grouped is marked with the dotted line.

При этом в пределах месторождения наблюдается пространственная гидрогеохимическая неоднородность, выраженная в различиях некоторых физико-химических показателей (поверхностные температуры, концентрации Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- и др.) термоминеральных вод, разгружаемых на разных участках – Северном, Центральном и Южном. Больше всего эта неоднородность проявляется в варьировании общей минерализации термоминеральных вод – от 1.3 до 23.7 г/л. Такой разброс значений общей минерализации обусловлен приуроченностью месторождения к прибрежной части Ныйского залива, где морские воды оказывают значительное влияние на его гидрогеологический режим. Воды источников, расположенных непосредственно в приливно-отливной зоне – на Северном участке, имеют более высокую минерализацию, тогда как по мере удаления от прибрежной зоны – к Центральному и Южному участкам – минерализация вод снижается, достигая наиболее низких значений.

Несмотря на то что термоминеральные воды на трех разных участках имеют одинаковый Cl-Na состав, соотношение компонентов ионно-солевого состава в них несколько различно. В частности, для Северного участка характерны более высокие отношения K/Cl , Ca/Cl , Mg/Cl , SO_4/Cl , Cl/B , для Центрального и Южного участков – Na/Cl , HCO_3/Cl , Si/Cl . Установленные различия в химическом составе термоминеральных вод, разгружаемых на разных участках, сохраняются во времени, что свидетельствует о стабильном гидрогеологическом режиме месторождения.

Важно отметить, что в исследуемых водах не наблюдается четкой пространственной дифференциации по содержанию микрокомпонентов Br^- , B , Li^+ . Кроме того, даже в пределах одного участка концентрации указанных микрокомпонентов, полученные разными исследователями, часто различаются в несколько раз. Мы связываем это с химико-аналитическими особенностями измерений микрокомпонентов. Подобные нюансы важно учитывать для корректной интерпретации гидрогеохимических данных, в том числе и для расчета пластовых температур. В частности, для большей части проб 2017 и 2019 гг. по Na-Li и Mg-Li гидрохимическим геотермометрам были получены аномально низкие температуры – очень низкие положительные или даже отрицательные значения. Поэтому наилучшими оценками пла-

стовых температур Дагинского месторождения мы полагаем рассчитанные по Na-K, K-Mg и SiO_2 геотермометрам.

Наше утверждение о стабильности гидрогеологического режима Дагинского месторождения подтверждают оценки пластовых температур, сделанные по гидрохимическим геотермометрам, и установленные на их основе глубины циркуляции термоминеральных вод. Согласно полученным данным, пластовые температуры для Дагинского месторождения с 2004 по 2019 г. составляют преимущественно от 60 до 100 °С, что соответствует глубине циркуляции термоминеральных вод около 2–3 км.

Выполненные в настоящей работе систематизация и сравнительный анализ гидрогеохимических данных Дагинского месторождения, полученных в разные периоды времени, представляют основу для изучения дальнейшей динамики физико-химических показателей термоминеральных вод. Например, информация о влиянии (негативном или позитивном?) на обсуждаемый природный объект проведенных мероприятий по реконструкции термоминеральных источников противоречива. В дальнейшем планируется продолжить наши исследования и оценить, в том числе, возможные изменения физико-химических показателей термоминеральных вод Дагинского месторождения после реконструкции 2019–2020 гг.

Список литературы

1. Aydin H., Karakuş H., Mutlu H. 2020. Hydrogeochemistry of geothermal waters in eastern Turkey: Geochemical and isotopic constraints on water-rock interaction. *J. of Volcanology and Geothermal Research*, 390: 106708. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106708>
2. Davraz A. 2008. Hydrogeochemical and hydrogeological investigations of thermal waters in the Usak Area (Turkey). *Environmental Geology*, 54: 615–628. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0829-0>
3. Chimeddorj B., Munkhbat D., Altanbaatar B., Dolgorjav O., Oyuntsetseg B. 2021. Hydrogeochemical characteristics and geothermometry of hot springs in the Mongolian Altai region, Mongolia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 21(4). doi:10.1144/geochem2021-016
4. Mao X., Zhu D., Ndikubwimana I., He Y., Shi Z. 2021. The mechanism of high-salinity thermal groundwater in Xinzhou geothermal field, South China: Insight from water chemistry and stable isotopes. *Journal of Hydrology*, 593: 125889. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125889>
5. Micallef A., Person M., Berndt C., Bertoni C., Cohen D., Dugan B., Evans R., Haroon A., Hensen C. et al. 2020. Offshore freshened groundwater in continental margins. *Reviews of Geophysics*, 58: e2020RG000706. <https://doi.org/10.1029/2020RG000706>
6. Luo J., Li Y., Tian J., Cheng Y., Pang Z., Gong Y. 2022. Geochemistry of geothermal fluid with implications on cir-

- culation and evolution in Fengshun-Tangkeng geothermal field, South China. *Geothermics*, 100: 102323. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102323>
7. Su S., Li Y., Chen Z., Chen Q., Liu Z., Lu C., Hu L. **2022**. Geochemistry of geothermal fluids in the Zhangjiakou-Peng-lai Fault Zone, North China: Implications for structural segmentation. *J. of Asian Earth Sciences*, 230: 105218. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2022.105218>
 8. Wei Z.-A., Shao H., Tang L., Deng B., Li H., Wang C. **2021**. Hydrogeochemistry and geothermometry of geothermal waters from the Pearl River Delta region, South China. *Geothermics*, 96: 102164. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102164>
 9. Wrage, J., Tardani, D., Reich, M., Daniele, L., Arancibia, G., Cembrano, J., Sánchez-Alfaro P., Morata D., Pérez-Moreno R. **2017**. Geochemistry of thermal waters in the Southern Volcanic Zone, Chile – Implications for structural controls on geothermal fluid composition. *Chemical Geology*, 466: 545–561. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.07.004>
 10. Yi L., Qi J., Li X., Xu M., Zhang X., Zhang Q., Tang Y. **2021**. Geochemical characteristics and genesis of the high-temperature geothermal systems in the north section of the Sanjiang Orogenic belt in southeast Tibetan Plateau. *J. of Volcanology and Geothermal Research*, 414: 107244. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107244>
 11. Жарков Р.В. **2018**. Современные физико-химические особенности термоминеральных вод Дагинского месторождения (о. Сахалин). *Мониторинг. Наука и технологии*, 4(37): 35–40. <https://doi.org/10.25714/MNT.2018.37.004>
 12. Жарков Р.В. **2008**. Дагинское месторождение термоминеральных вод на севере о. Сахалин. В кн.: *Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: Сб. материалов II Сахалинской молодежной научной школы, 4–10 июня 2007, Южно-Сахалинск*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 285–290.
 13. Павлова В.Ю., Жарков Р.В. **2018**. Результаты георадарных исследований на территории Дагинской гидротермальной системы (остров Сахалин). *Геосистемы переходных зон*, 2(4): 323–331. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.323-331>
 14. Завадский И.Г. **1991**. *Разведочные работы на Дагинском месторождении термальных вод в Ногликском районе: отчет за 1990–1991 гг.* Южно-Сахалинск, Сахалингеология, 218 с. Инв. № 7078 (Фонды ФБУ ТФГИ по Сахалинской области).
 15. Цитенко Н.Д. **1961**. Воды Дагинских горячих ключей на о. Сахалине (к вопросу о формировании химического состава хлоркальциевых вод). *Труды ВНИГРИ*, 181: 203–212.
 16. *Геология СССР*. Т. 32. *Остров Сахалин. Геологическое описание*. **1970**. М.: Недра, 432 с.
 17. *Гидрогеология СССР*. Т. 34. *Остров Сахалин*. **1972**. М.: Недра, 344 с.
 18. Цитенко Н.Д. **1961**. Грязевые вулканы в Дагинском районе о. Сахалина. *Труды ВНИГРИ*, 181: 171–175.
 19. Никитенко О.А., Ершов В.В. **2020**. Гидрогеохимическая характеристика проявлений грязевого вулканизма на острове Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 4(3): 321–350. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.321-335.336-350>
 20. Fournier R.O., Potter R.W., II. **1982**. A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. *Geothermal Resources Council Bull.*, 11: 3–12.
 21. Giggenbach W.F. **1988**. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12): 2749–2765. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)
 22. Kharaka Y.K., Mariner R.H. **1989**. Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. In: *Thermal History of Sedimentary Basins, Methods and Case Histories*. New York, Springer, 99–117. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3492-0_6
 23. Мельников О.А., Сергеев К.Ф., Рыбин А.В., Жарков Р.В. **2005**. О новом активном извержении одного из «грязевых» (газоводолитокластитовых) вулканов на Сахалине и природе грязевого вулканизма. *Доклады Академии наук*, 400(4): 536–541.
 24. Григель Н.М. **1959**. *Характеристика и происхождение пластовых вод нефтеносных районов Северного Сахалина: прил. к отчету о НИР «Результаты химического анализа вод нефтеносных районов Северного Сахалина»*. Оха: Сах. отд-ние ВНИГРИ, т. 2, 77 с. Инв. № 1369ф (Фонды ИМГиГ ДВО РАН).
 25. Штейн М.А. **1962**. Определение параметров и глубин залегания термальных подземных вод. *Труды СахКНИИ*, 12: 162–165.

References

1. Aydin H., Karakuş H., Mutlu H. **2020**. Hydrogeochemistry of geothermal waters in eastern Turkey: Geochemical and isotopic constraints on water-rock interaction. *J. of Volcanology and Geothermal Research*, 390: 106708. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106708>
2. Davraz A. **2008**. Hydrogeochemical and hydrogeological investigations of thermal waters in the Usak Area (Turkey). *Environmental Geology*, 54: 615–628. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0829-0>
3. Chimeddorj B., Munkhbat D., Altanbaatar B., Dolgorjav O., Oyuntsetseg B. **2021**. Hydrogeochemical characteristics and geothermometry of hot springs in the Mongolian Altai region, Mongolia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 21(4). doi:10.1144/geochem2021-016
4. Mao X., Zhu D., Ndikubwimana I., He Y., Shi Z. **2021**. The mechanism of high-salinity thermal groundwater in Xinzhou geothermal field, South China: Insight from water chemistry and stable isotopes. *Journal of Hydrology*, 593: 125889. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125889>
5. Micallef A., Person M., Berndt C., Bertoni C., Cohen D., Dugan B., Evans R., Haroon A., Hensen C. et al. **2020**. Offshore freshened groundwater in continental margins. *Reviews of Geophysics*, 58: e2020RG000706. <https://doi.org/10.1029/2020RG000706>
6. Luo J., Li Y., Tian J., Cheng Y., Pang Z., Gong Y. **2022**. Geochemistry of geothermal fluid with implications on circulation and evolution in Fengshun-Tangkeng geothermal field, South China. *Geothermics*, 100: 102323. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102323>
7. Su S., Li Y., Chen Z., Chen Q., Liu Z., Lu C., Hu L. **2022**. Geochemistry of geothermal fluids in the Zhangjiakou-Peng-lai Fault Zone, North China: Implications for structural segmentation. *J. of Asian Earth Sciences*, 230: 105218. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2022.105218>
8. Wei Z.-A., Shao H., Tang L., Deng B., Li H., Wang C. **2021**. Hydrogeochemistry and geothermometry of geothermal waters from the Pearl River Delta region, South China. *Geothermics*, 96: 102164. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102164>
9. Wrage, J., Tardani, D., Reich, M., Daniele, L., Arancibia, G., Cembrano, J., Sánchez-Alfaro P., Morata D., Pérez-Moreno R. **2017**. Geochemistry of thermal waters in the Southern Volcanic Zone, Chile – Implications for structural controls on geothermal fluid composition. *Chemical Geology*, 466: 545–561. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.07.004>

10. Yi L., Qi J., Li X., Xu M., Zhang X., Zhang Q., Tang Y. **2021**. Geochemical characteristics and genesis of the high-temperature geothermal systems in the north section of the Sanjiang Orogenic belt in southeast Tibetan Plateau. *J. of Volcanology and Geothermal Research*, 414: 107244. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107244>
11. Zharkov R.V. **2018**. Modern physicochemical features of thermomineral water of the Daginsky deposit (Sakhalin Island). *Monitoring. Nauka i tekhnologii = Monitoring. Science and Technologies*, 4(37): 35–40. (In Russ). <https://doi.org/10.25714/MNT.2018.37.004>
12. Zharkov R.V. **2008**. [Daginsky field of thermomineral waters in the north of Sakhalin Island]. In: *Prirodnyye katastrofy: izucheniye, monitoring, prognoz. Sb. materialov II Sakhalinskoy molodezhnoy nauchnoy shkoly, 4–10 iyunya 2007, Yuzhno-Sakhalinsk* [Natural catastrophes: study, monitoring, forecast: Proceedings of the II Sakhalin scientific school for young researchers, June 4–10, 2007, Yuzhno-Sakhalinsk]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 285–290. (In Russ.).
13. Pavlova V.Yu., Zharkov R.V. **2018**. GPR surveys of the discharge zone of the Daginsky hydrothermal system (Sakhalin Island). *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 323–331. (In Russ). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.323-331>
14. Zavadskiy I.G. **1991**. *Razvedochnyye raboty na Daginskoy mestorozhdenii termal'nykh vod v Noglikom rayone: otchet za 1990–1991 gg.* [Exploration work at the Daginsky field of thermal waters in the Nogliki District: a report for 1990–1991]. Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalingeology, 218 p. Inv. № 7078 (Fondy FBU TFGI for the Sakhalin Region). (In Russ.).
15. Tsitenko N.D. **1961**. [Waters of the Daginsky hot springs on the Island of Sakhalin (on the problem of formation of chemical composition of calcium chloride waters)]. *Trudy VNIGRI* [Transactions of the All-Union Scientific Research Institute of Petroleum Geology], 181: 203–212. (In Russ.).
16. [Geology of the USSR]. Vol. 32. [Sakhalin Island. Geological description]. **1970**. Moscow: Nedra, 432 p. (In Russ.).
17. [Hydrogeology of the USSR]. Vol. 34. [Sakhalin Island]. **1972**. Moscow: Nedra, 344 p. (In Russ.).
18. Tsitenko N.D. **1961**. [Mud volcanoes in the Daginsky area of Sakhalin Island]. *Trudy VNIGRI* [Transactions of the All-Union Scientific Research Institute of Petroleum Geology], 181: 171–175. (In Russ.).
19. Nikitenko O.A., Ershov V.V. **2020**. Hydrogeochemical characteristic of mud volcanism manifestations on Sakhalin Island. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(3): 321–350. (In Russ & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.321-335.336-350>
20. Fournier R.O., Potter R.W., II. **1982**. A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. *Geothermal Resources Council Bull.*, 11: 3–12.
21. Giggenbach W.F. **1988**. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12): 2749–2765. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)
22. Kharaka Y.K., Mariner R.H. **1989**. Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. In: *Thermal History of Sedimentary Basins, Methods and Case Histories*. New York, Springer, 99–117. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3492-0_6
23. Mel'nikov O.A., Sergeev K.F., Rybin A.V., Zharkov R.V. **2005**. Nature of mud volcanism: Evidence from the latest active eruption of a mud (Gas-Water-Lithoclastite) volcano in Sakhalin. *Doklady Earth Sciences*, 400(1): 168–172.
24. Grigel' N.M. **1959**. *Kharakteristika i proiskhozhdenie plavnykh vod neftenosnykh rayonov Severnogo Sakhalina: pril. k otchetu o NIR «Rezultaty khimicheskogo analiza vod neftenosnykh rayonov Severnogo Sakhalina»* [Characteristic and origin of stratum waters of the oil-bearing areas of the Northern Sakhalin: app. to the report on scientific research “The results of the chemical analysis of the waters of oil-bearing areas of the Northern Sakhalin”]. Okha: Sakh. otd-nie VNIGRI, vol. 2, 77 p. Inv. № 1369F (Fondy IMGIG DVO RAN). (In Russ.).
25. Shteyn M.A. **1962**. *Opreделение parametrov i glubin zaleganiya termal'nykh podzemnykh vod* [Determination of the parameters and depths of underground thermal water occurrence]. *Trudy SakhKNII* [Transactions of the Sakhalin Complex Scientific Research Institute], 12: 162–165. (In Russ.).

Об авторах

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

Никитенко Ольга Александровна (<https://orcid.org/0000-0002-0177-2147>), научный сотрудник, nikitenko.olga@list.ru

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

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

Сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск:

Жарков Рафаэль Владимирович (<https://orcid.org/0000-0002-9753-0627>), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, rafael_zharkov@mail.ru

About the Authors

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

Nikitenko, Olga A. (<https://orcid.org/0000-0002-0177-2147>), Researcher, nikitenko.olga@list.ru

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

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

Employee of the Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk:

Zharkov, Rafael V. (<https://orcid.org/0000-0002-9753-0627>), Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, rafael_zharkov@mail.ru

Поступила 25.07.2022

После доработки 25.08.2022

Принята к печати 29.08.2022

Received 25 July 2022

Revised 25 August 2022

Accepted 29 August 2022

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



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

УДК 551.21

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.195-205>
<https://www.elibrary.ru/dxcfhz>

Активность вулканов Курильских островов в 2020–2021 гг.

А. В. Дегтерев*, М. В. Чибисова

*E-mail: d_a88@mail.ru

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

Реферат. Приводятся данные по вулканической активности на Курильских островах в течение 2020–2021 гг. На основе спутниковых данных и результатов визуальных наблюдений охарактеризована активность вулканов Эбеко (о. Парамушир), Чиринкотан (о. Чиринкотан) и Пик Сарычева (о. Матуа). В 2020–2021 гг. на влк. Эбеко продолжилось слабое (до умеренного) эксплозивное извержение (VEI 1-2), начавшееся осенью 2016 г. На протяжении рассматриваемого периода было зафиксировано не менее 1169 выбросов на высоту 1.5–3 (до 5) км н.у.м. В интервале с мая по июль отмечено резкое усиление эксплозивной деятельности вулкана, за это время произошло более половины от общего числа взрывов: 2020 г. – 298 из 558, 2021 г. – 344 из 611. В г. Северо-Курильск периодически отмечались пеплопады различной интенсивности. В декабре 2021 г. активная фаза извержения закончилась, произошло лишь 2 слабых выброса. На влк. Чиринкотан в период с 8 по 23 августа 2021 г. имело место умеренное (VEI 2) эксплозивное извержение. Зафиксировано не менее 12 вулканических взрывов на высоту от 1.5 до 4.5 км н.у.м. На влк. Пик Сарычева с декабря 2020 по февраль 2021 г. имело место эффузивное извержение: кратер заполнялся лавой, после чего произошло ее излияние по северо-западному склону постройки. В 2021 г. наблюдались проявления нескольких эпизодов эксплозивного характера: 29 июня, 1 июля, 6 августа и 26 ноября 2021 г. зафиксированы единичные, относительно слабые выбросы на высоту около 2.2–3 км н.у.м. (VEI 2).

Ключевые слова: Курильские острова, вулкан, извержение, вулканический пепел, спутниковые снимки, данные дистанционного зондирования

Volcanic activity of the Kuril Islands in 2020–2021

Artem V. Degterev*, Marina V. Chibisova

*E-mail: d_a88@mail.ru

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

Abstract. The data on volcanic activity in the Kuril Islands during 2020–2021 are presented. The activity of Ebeko (Paramushir Island), Chirinkotan (Chirinkotan Island) and Sarychev Peak (Matua Island) volcanoes is characterized on the basis of satellite data and results of visual observations. In 2020–2021 a weak (to moderate) explosive eruption (VEI 1-2), which has begun in autumn 2016, continued on Ebeko volcano. During the period under review, at least 1169 emissions were recorded at a height of 1.5–3 (up to 5) km a.s.l. In the interval from May till July, a sharp increase in the explosive activity of the volcano was noted, during this time more than half of the total number of explosions occurred: 2020 – 298 out of 558, 2021 – 344 out of 611. The ashfalls of varying intensity were periodically observed in Severo-Kurilsk. The active phase of the eruption has ended in December 2021, only 2 weak explosions occurred. A moderate (VEI 2) explosive eruption took place on Chirinkotan volcano from August 8 to August 23, 2021. At least 12 volcanic explosions were recorded at a height of 1.5 to 4.5 km a.s.l. An effusive eruption was observed on the Sarychev Peak volcano from December 2020 till February 2021: the crater was filled with lava, after which it erupted along the northeastern slope of the edifice. In 2021, the activity of the volcano was characterized by manifestations of several episodes of an explosive nature: on June 29, July 1, August 6, and November 26, single, relatively weak ejections to a height of about 2.2–3 km a.s.l. were recorded (VEI 2).

Keywords: Kuril Islands, volcano, eruption, volcanic ash, satellite images, remote sensing data

Для цитирования: Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Активность вулканов Курильских островов в 2020–2021 гг. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 3, с. 195–205. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.195-205>; <https://www.elibrary.ru/dxcfhz>

For citation: Degterev A.V., Chibisova M.V. Volcanic activity of the Kuril Islands in 2020–2021. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 195–205. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.195-205>; <https://www.elibrary.ru/dxcfhz>

Благодарности и финансирование

Авторы признательны участникам российско-белорусской экспедиции, выполнявшим работы на Курильских островах в рамках составной части НИР «Интеграция-СГ-3.2.5.1», за предоставленные сведения об активности вулканов Чиринкотан и Пик Сарычева в 2021 г.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР лаборатории вулканологии и вулканопасности ИМГиГ ДВО РАН (№ 121030100168-3; рук. А.В. Дегтерев), а также при поддержке гранта Президента РФ «Современные газогеохимические особенности газогидротермальных систем, грязевых вулканов, термальных и минеральных источников острова Сахалин, их связь с сейсмичностью и формированием газоопасных зон заселенных территорий», 2021–2022 гг. (рук. Н.С. Сырбу, Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН им. В.И. Ильичева).

Введение

Курильские острова, входящие в состав Сахалинской области РФ, являются ареной проявления современного активного вулканизма – здесь расположено 36 действующих вулканов (рис. 1), с которыми за историческое время (последние ~270 лет) связано не менее 136 различных по силе и типу проявлений вулканической активности [1–3], из них 38 имели место

Acknowledgements and funding

The authors are grateful to the participants of the Russian-Belarusian expedition, who performed the work on the Kuril Islands as part of the research scientific work «Integration-SG-3.2.5.1» for providing information about the activity of the Chirinkotan and Sarychev Peak volcanoes in 2021.

The work was performed in accordance with the research plan of the Laboratory of volcanology and volcanic hazard, IMGG FEB RAS (no. 121030100168-3; headed by A.V. Degterev), as well as with the support of the Russian Presidential grant «Modern gas-geochemical features of gas hydrothermal systems, mud volcanoes, thermal and mineral springs of Sakhalin Island, their relation to seismicity and formation of gas hazardous zones of the populated territories», 2021–2022. (headed by N.S. Syrbu, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS).

в текущем столетии [4]. Некоторые извержения приводили к негативным последствиям, включая человеческие жертвы (вулканы Райкоке (о. Райкоке, 1778 г.), Синарка (о. Шиашкотан, 1872), Пик Севергина (о. Харимкотан, 1933) [1]). Вулканическая деятельность оказывает неблагоприятное воздействие на качество жизни населения, проживающего на островах (регулярные пеплопады и газовые эманации в г. Северо-Курильск, связанные с активностью влк. Эбеко, о. Парамушир).

В настоящее время на островах Кунашир, Итуруп (Южные Курилы) и Парамушир (Северные Курилы) проживает постоянное гражданское население ~23 тыс. человек, регулярно прибывают сезонные работники и туристы. Активно функционируют объекты инфраструктуры (морские порты, аэропорты) и производства (главным образом предприятия рыбопромышленного комплекса); создана территория опережающего развития, подразумевающая интенсификацию развития рыбной и туристической отрасли [<https://erdc.ru/tors/kurily.html>]. Количество туристов в последние годы резко выросло из-за интенсификации внутреннего туризма в 2021–2022 гг. (при этом действующие вулканы и их окрестности являются популярными местами посещения).

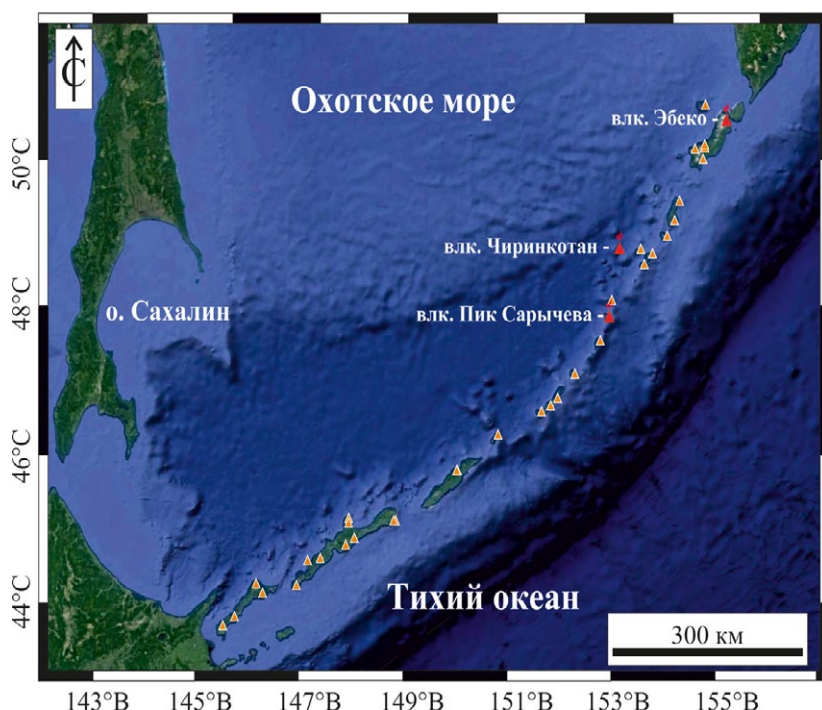


Рис. 1. Географическое положение вулканов Эбеко (о. Парамушир), Чиринкотан (о. Чиринкотан) и Пик Сарычева (о. Матуа) в системе Курильской островной дуги. Красными треугольниками отмечены действующие вулканы.

Fig. 1. Geographical position of the volcanoes Ebeko (Paramushir Island), Chirinkotan (Chirinkotan Island), and Sarychev Peak (Matua Island) in the system of the Kuril Island Arc. Red triangles mark the active volcanoes.

Кроме того, вдоль Курильской островной гряды проложено большое количество международных и региональных авиатрасс, характеризующихся постоянной загруженностью трафика (<https://www.flightradar24.com/46.73,150.95/6#>). А вулканический пепел, выбрасываемый при эксплозивных извержениях, как известно, представляет серьезную опасность для авиатранспорта.

Для своевременного обнаружения активизации вулканической деятельности на островах и последующего оповещения населения и административных структур необходим постоянный оперативный мониторинг вулканической активности. С 2003 г. такой мониторинг на Курильских островах осуществляет Сахалинская группа реагирования на вулканические извержения (Sakhalin Volcanic Eruption Response Team, SVERT), созданная на базе лаборатории вулканологии и вулканопасности Института морской геологии и геофизики ДВО РАН. В целях предупреждения опасности и минимизации возможного риска, связанного с вулканическими извержениями, SVERT анализирует все доступные данные о состоянии действующих вулканов Курильских островов, на основе которых создаются ежедневные и еженедельные информационные отчеты на сайте ИМГиГ ДВО РАН. Они рассылаются во все заинтересованные организации (ГУ МЧС России по Сахалинской области, VAAC Токио).

В 2020–2021 гг. на Курильских островах активность проявляли вулканы Эбеко (о. Парамушир), Чиринкотан (о. Чиринкотан) и Пик Сарычева (о. Матуа) (рис. 1). Мониторинг вулканической активности основывался на спутниковых данных, поставляемых лабораторией дистанционного зондирования Земли (СахГУ, г. Южно-Сахалинск), а также данных информационных систем «ВЕГА-Science» [5] и «Дистанционный мониторинг вулканов Камчатки и Курил» VolSatView [6, 7]. Для выявления термальных аномалий и пепловых облаков использовались возможности сервисов MOUNTS (<http://www.mounts-project.com/home>; [8]) и MIROVA (<http://www.mirovaweb.it/>). Данные этих информационных систем позволяют изучать динамику извержений – отслеживать перемещение пепловых облаков и шлейфов, определять их площадь, направление и высоту. Использо-

вались главным образом снимки среднего и низкого разрешения: NOAA-18/19 (AVHRR/POES), Terra/Aqua (MODIS), SuomiNPP и JPSS-1 (VIIRS) и Himawari-8. По разности инфракрасных каналов 10–12 мкм (4–5 каналы AVHRR, 31–32 каналы MODIS, 14–15 каналы Himawari-8, VIIRS) хорошо фиксируются пепловые шлейфы и эруптивные облака.

Активность влк. Эбеко на о. Парамушир отслеживали преимущественно при помощи камеры видеонаблюдения AXIS (0526-001), установленной в октябре 2017 г. на территории г. Северо-Курильск Камчатским филиалом ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» совместно с ИМГиГ ДВО РАН. Изображения с камеры обновляются каждые 2 мин, позволяя при благоприятных погодных условиях осуществлять оперативный мониторинг вулканической активности с высокой степенью детальности. Спутниковые данные, как показала практика, малопригодны для отслеживания эксплозий влк. Эбеко ввиду кратковременности выбросов, их относительно небольшой высоты и неблагоприятных погодных условий.

Дополнительно, после проверки и подтверждения, привлекались сведения из СМИ, полученные случайными очевидцами – туристами, местными жителями и др. (фото- и видеоматериалы, описательные данные).

Активность вулканов Эбеко, Чиринкотан, Пик Сарычева в 2020–2021 гг.

Вулкан Эбеко (абс. выс. 1156 м), расположенный в хр. Вернадского, трассирующем северную часть о. Парамушир (Северные Курильские о-ва) (рис. 1), по частоте и продолжительности извержений является наиболее активным вулканом на Курильских островах. Для него характерны продолжительные (до нескольких лет) периоды эксплозивной активности, состоящие из регулярных относительно слабых вулканических взрывов на высоту до 2–3, реже до 5–6 км н.у.м. В среднем за месяц может наблюдаться порядка 40–70 таких эксплозий (от 5–10 до 100 и более, по данным наблюдений за период 2018–2021 гг.) (рис. 2). В историческое время извержения влк. Эбеко происходили в 1793, 1833–1834, 1859, 1934–1935, 1963, 1965, 1967–1971, 1987–1991, 2009, 2010–2011 гг. [1, 9, 10], механизмы их варьировали

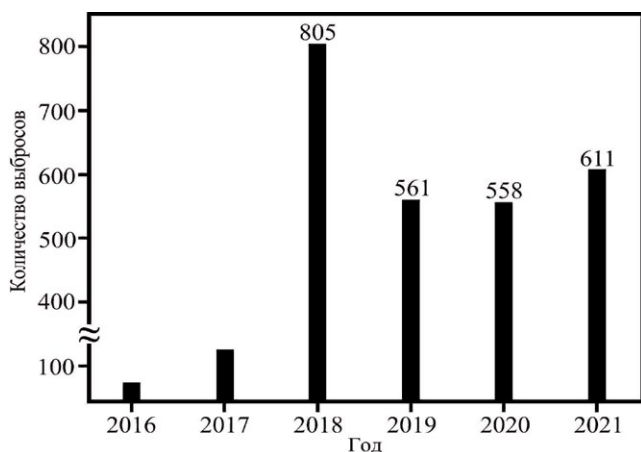


Рис. 2. Распределение количества выбросов на вулкане Эбеко с 2016 по 2021 г.

Fig. 2. Distribution of the emission amount at Ebeko volcano from 2016 till 2021.

от чисто фреатических до фреато-магматических и магматических [11].

В 7 км к востоку от влк. Эбеко расположен г. Северо-Курильск с численностью населения 2691 чел. (по состоянию на 01.01.2021 г.), что делает мониторинг его активности важной практической задачей: извержение вулкана нередко сопровождается пеплопадами и выделением вулканических газов, кроме того, существует вероятность схода грязекаменных потоков – лахаров [12].

В октябре 2016 г. начался очередной период эксплозивной активности влк. Эбеко, продолжающийся вплоть до декабря 2021 г., в форме регулярных пепло-газовых выбросов умеренной силы [13–16]. Высота выбросов составляла 1–3 (до 5.5) км н.у.м., а протяженность пепловых шлейфов, как правило, не превышала 5–10 км [14, 15]. Состав изверженных пород соответствовал андезитам (преобладают) и андезибазальтам высококальциевой серии [11]. В окрестностях Северо-Курильска неоднократно наблюдались пеплопады и регистрировалось превышение предельно допустимых концентраций SO_2 и H_2S [16].

На протяжении всего времени группа SVERT осуществляла оперативный мониторинг активности влк. Эбеко, используя спутниковые и опросные данные, а с октября 2017 г. – результаты видеонаблюдения. Статистика по количеству зарегистрированных выбросов представлена на рис. 2: в 2016 г. их было отмечено около 45, в 2017 г. 120, в 2018 г. их количество

резко возросло – до 805, что связано с началом использования данных с камеры видеонаблюдения, которая позволила осуществлять мониторинг эксплозивной активности влк. Эбеко непрерывно (определенные ограничения накладывали лишь погодные условия и темное время суток, тем не менее детальность наблюдений стала на порядок выше). Более подробно детали активности вулкана в 2016–2019 гг. рассмотрены в [13, 15].

В 2020–2021 гг. характер эруптивной деятельности влк. Эбеко принципиально не изменился: происходили частые пепло-газовые выбросы (рис. 3, 4) фреатической природы из жерл, локализованных в Новом Северном кратере (кратер Корбута) [15, 17].

В 2020 г. за год камерой видеонаблюдения было зафиксировано 558 выбросов (в светлое время суток, при отсутствии облачности и тумана) на высоту от 1.5 до 5 км н.у.м., из них 226 – на высоту 3 км н.у.м. и более. Пепловые шлейфы имели протяженность 5–10 км и были направлены главным образом на юг, юго-восток, северо-восток и север [18].

В период с мая по июль наблюдалась фаза повышенной эксплозивной активности вулкана, выражавшаяся в увеличении количества

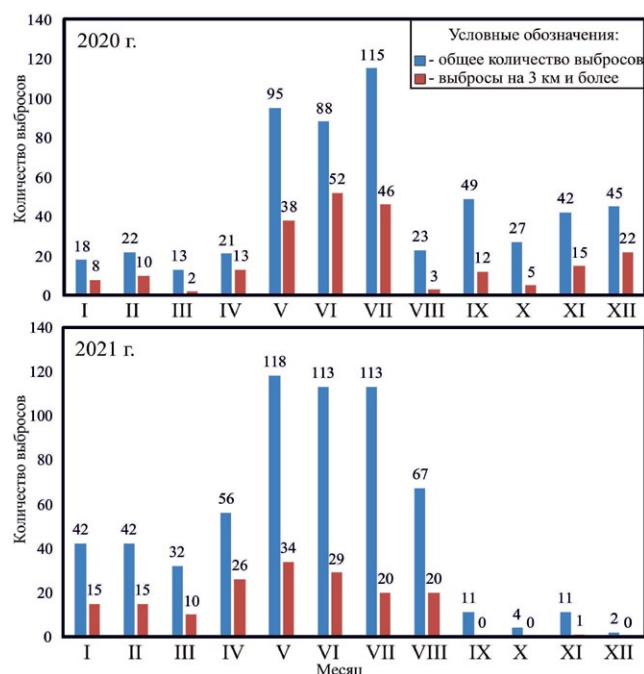


Рис. 3. Распределение по месяцам общего количества выбросов и выбросов выше 3 км н.у.м на вулкане Эбеко в 2020 и 2021 гг.

Fig. 3. Monthly distribution of total emissions and emissions above 3 km a.s.l. at Ebeko volcano in 2020 and 2021.

выбросов и их высоты. Следует отметить, что в работе [17] на основе изучения напряженности электрического поля атмосферы в районе вулкана и визуальных данных был сделан аналогичный вывод об активизации вулкана начиная с конца апреля 2020 г. За это время произошло более половины от общего числа зарегистри-

рованных взрывов: 298 из 558 (53.41 %) (при этом 136 событий (45.64 %) были на высоту 3 км и более). Наиболее четко активизация проявилась в распределении выбросов на высоту более 3 км н.у.м.: в апреле было зарегистрировано 21 такое событие, а в мае их количество возросло до 95, увеличившись более чем

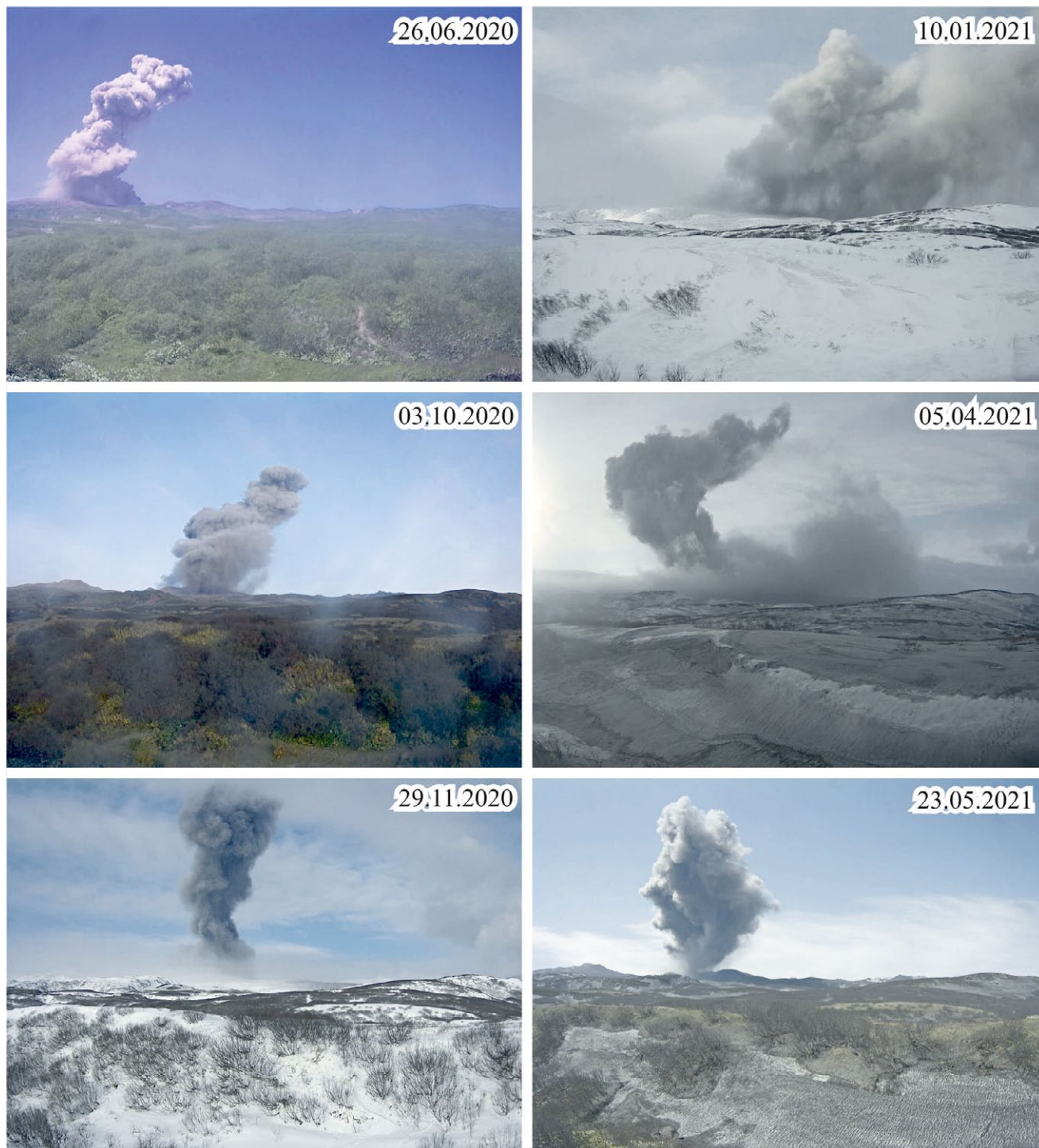


Рис. 4. Эксплозивная активность вулкана Эбеко в 2020–2021 гг. Фото с камеры видеонаблюдения.

Fig. 4. Explosive activity of Ebeko volcano in 2020–2021. Photo from a surveillance camera

в 4.5 раза (рис. 3). Далее на протяжении 3 мес. сохранялась максимальная за рассматриваемый период частота эксплозий: в среднем не менее 3 выбросов в день, один из которых на высоту 3 км и более (рис. 3). В июле было зафиксировано 115 взрывов, что стало максимальным значением для 2020 г.

В 2021 г. Эбеко продолжил работу в прежнем режиме, суммарно за год было зафиксировано 611 выбросов на высоту от 1.5 до 5 км н.у.м., из них 170 – на высоту 3 км и более (рис. 5). С мая по август, как и в предыдущем году, отмечалось существенное повышение активности вулкана (зафиксировано 344 события из 611 в 2021 г. (56.3 %)): в мае по сравнению с апрелем количество эксплозий выросло более чем в 2 раза (с 56 до 118) (рекордное значение за период 2018–2021 гг. было зарегистрировано в сентябре 2018 г. – 133 события).

Сравнивая между собой периоды повышенной активности влк. Эбеко за 2020

и 2021 гг., следует отметить их некоторые различия. В 2021 г. общее количество выбросов было заметно выше (май – 118, июнь – 113, июль – 113), чем в 2020 (май – 95, июнь – 88, июль – 115), однако их сила (высота) была меньше: в 2020 г. с мая по июль отмечено 136 эксплозий на высоту 3 км и более, в то время как в 2021 их было 83. Начиная с сентября отмечается заметное снижение эруптивной деятельности вулкана. Всего за сентябрь–декабрь зафиксировано 28 выбросов, из них 1 на высоту 3 км н.у.м (рис. 3). Активная фаза извержения закончилась в декабре 2021 г.: было зафиксировано всего 2 слабых выброса, последний из которых произошел 19 декабря, после чего наблюдалась лишь парогазовая активность. Это был наиболее продолжительный период покоя за все время видеонаблюдений за влк. Эбеко (с 2018 г.).

Вулкан Чиринкотан (абс. выс. 724 м) расположен в западной вулканической зоне, к западу от островов Экарма и Шиашкотан (рис. 1). Его постройка представляет собой одиночный остров-вулкан с высотой надводного основания 724 м н.у.м. и крупным (диаметр ~800 м) кратером, открытым на юго-запад. Подводная часть, по данным [1], достигает 2500 м, т.е. общая высота вулкана составляет ~3000 м. Исторические извержения влк. Чиринкотан происходили в 1760, 1878–1889(?), 1955(?), 1979–1980, 2004, 2013–2017 гг. [1, 4, 19–22].

В 2021 г. на влк. Чиринкотан началось очередное извержение: 8 августа в 06:45 UTC (Coordinated Universal Time – всемирное координированное время) VAAC Токио (Volcanic Ash Advisory Center – Консультативный центр по вулканическому пеплу) по спутниковым данным Himawari-8 был зафиксирован взрыв, поднявший пепловую колонну на высоту 2.5 км н.у.м. В течение следующих дней 9–10, 14–15, 17–18, 22–23 августа 2021 г. происходили выбросы на высоту от 1.5 до 4.5 км н.у.м. Пепловые облака перемещались преимущественно на юго-запад, юг, восток, юго-восток и северо-восток (рис. 6). Наиболее интенсивно эксплозивная активность вулкана проявлялась 14 и 15 августа, в это время произошло наибольшее количество вулканических взрывов на максимальную высоту, а площадь пепловых облаков достигала 10 417.9 км². Пепловое облако,



Рис. 5. Пепловая колонна одного из взрывов на влк. Эбеко, 21.06.2021 г. Фото С.З. Смирнова

Fig. 5. Ash column of one of the explosions of Ebeko volcano, June 21, 2021. Photo by S.Z. Smirnov

перемещавшееся в юго-восточном направлении, по состоянию на 16 августа 2021 г. удалилось от вулкана на расстояние 215 км [23].

6 августа 2021 г. (за 2 дня до извержения) на вершине вулкана и на прилегающей к острову акватории проходила работа научно-исследовательской экспедиции [24]. Ее участниками была отмечена интенсивная фумарольная деятельность влк. Чиринкотан. Вечером 8 августа наблюдалось усиление активности вулкана: происходили слабые выбросы на фоне постоянной сильной парогазовой активности. Фиксировались небольшие пирокластические потоки, сходявшие по южному склону вулкана. 13 августа участники экспедиции, находившиеся на о. Шиашкотан, отмечали интенсивную парогазовую деятельность вулкана, сопровождаемую поступлением небольшого количества пепла. Высота парогазовых струй, поднимавшихся над кратером, составляла примерно 400–500 м. 14 августа в 13:15 по сахалинскому времени с рейда о. Шиашкотан на вулкане наблюдался еще один пирокластический поток, перемещавшийся сначала по южному склону, а затем и по прилегающей акватории более чем на 1 км.

Вулкан Пик Сарычева (абс. выс. 1446 м) формирует северо-западную часть о. Матуа, расположенного в центральной части Курильской островной дуги (рис. 1). Его постройка представляет собой типичный стратовулкан, образованный чередованием лав и пирокластиков, увенчанный вершинным кратером (рис. 7). Пик Сарычева – один из наиболее активных вулканов архипелага, его извержения происходили в 1765±5, 1878–1879, 1923, 1928, 1930, 1946, 1954, 1960, 1976, 2009, 2017–2018, 2020–2021 гг. [1, 25–28].

В 2020–2021 гг. имело место эффузивное извержение влк. Пик Сарычева, не характерное для исторического этапа его деятельности: с декабря 2020 г. до середины января 2021 происходило наполнение кратера вулкана лавой. Во второй половине января началось ее изливание

через расщелину в северо-северо-западном секторе кратера. Общая длина излившегося лавового потока составила 2 км, при ширине 80–90 м [28] (рис. 8). После этого на протяжении 2021 г. по данным сервисов MOUNTS (<http://www.mounts-project.com/home>; [8]) и MIROVA (<http://www.mirovaweb.it/>) регулярно отмечались термальные аномалии.

29 июня 2021 г. в 13:20 UTC по спутниковым данным Himawari-8 VAAC Токио был зафиксирован пепловый выброс на высоту 3 км н.у.м., шлейф которого распространялся в западно-северо-западном направлении на 30 км от вулкана. 1 июля в 05:10 UTC произошел еще один выброс высотой 3 км н.у.м., пепловый шлейф протяженностью 93 км распространялся в юго-восточном направлении. В момент взрывов и непосредственно перед ними регистрировались термальные аномалии – 25, 29, 30 июня, 1 июля 2021 г. В июле (4, 7, 9,

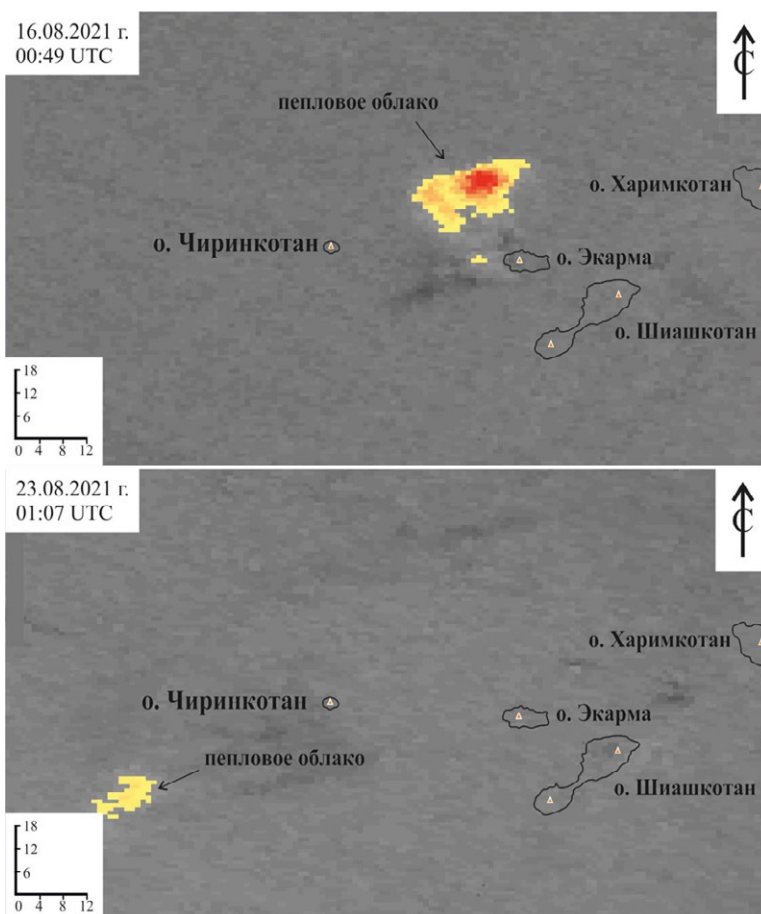


Рис. 6. Пепловые облака вулкана Чиринкотан на спутниковых снимках NOAA-18 (AVHRR/POES) из информационной системы «VEGA-Science».

Fig. 6. Ash clouds of Chirinkotan volcano on the NOAA-18 (AVHRR/POES) satellite images from the VEGA-Science information system.



Рис. 7. Вулкан Пик Сарычева, вид с юга. 2017 г. Фото А.В. Дегтерева
 Fig. 7. Sarychev Peak volcano, view from the south. 2017. Photo by A.V. Degterev

12, 17–19, 26, 27, 29, 30) также отмечены слабые термальные аномалии различной интенсивности (<http://www.mirovaweb.it/>; <http://www.mounts-project.com/home>).

5 августа 2021 г. члены экипажа экспедиционного судна «Курилгео», проходившего вблизи о. Матуа, никаких признаков активности влк. Пик Сарычева не отмечали, в том числе и характерной для него интенсивной сольфатарной деятельности. Однако на следующий день, 6 августа в 14:30, был отмечен единственный слабый выброс, на высоту приблизительно 750–800 м над кратером. После этого никаких визуально видимых признаков вулканической активности не наблюдалось.

26 ноября в 00:49 UTC по данным сервиса MOUNTS (<http://www.mounts-project.com/home>) зафиксировано последнее в 2021 г. эксплозивное событие на влк. Пик Сарычева: на снимке Sentinel-2 (SWIR) были зафиксированы слабый пепловый выброс и термальная аномалия (рис. 8). В связи с тем, что на спутниковом изображении был запечатлен начальный момент выброса, его высоту определить не удалось.

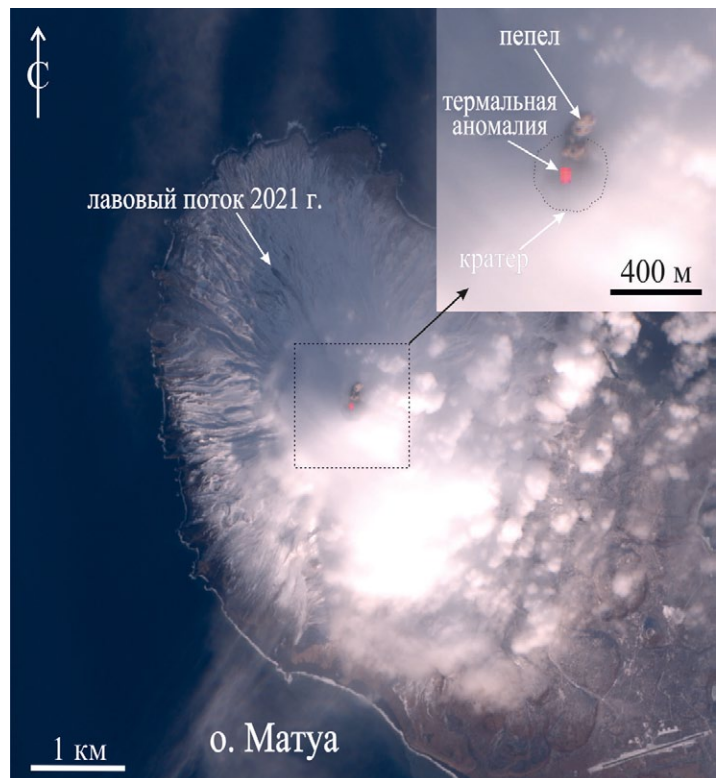


Рис. 8. Термальная аномалия и момент пеплового выброса на вулкане Пик Сарычева. Спутниковый снимок Sentinel-2, 26 ноября 2021 г.

Fig. 8. Thermal anomaly and the moment of ash ejection on Sarychev Peak volcano. Satellite image of Sentinel-2, November 26, 2021.

Заключение

1. В 2020–2021 гг. на влк. Эбеко продолжалось эксплозивное извержение, начавшееся в 2016 г. и выражавшееся в регулярных паро- и пепло-газовых выбросах слабой и умеренной силы. Всего за 2020–2021 гг. было зафиксировано более 1169 выбросов на высоту от 2 до 5 км. В 2020 и 2021 гг. в период с мая по июль наблюдались периоды существенного усиления активности, в течение которых резко увеличилась частота и высота выбросов. Эксплозивная активность вулкана сопровождалась периодическими пеплопадами в г. Северо-Курильск.

2. Камера видеонаблюдения показала себя весьма эффективным инструментом при мониторинге активности влк. Эбеко. Несмотря на ограничения, связанные с погодными условиями (облачность, туман, дождь и пр.), а также темным временем суток, она позволяет выполнять оперативное слежение за работой вулкана с высоким временным разрешением и детальностью.

3. На влк. Чиринкотан в период с 8 по 23 августа 2021 г. происходило умеренное (VEI 2) эксплозивное извержение: по спутниковым данным и наблюдениям очевидцев зафиксировано не менее 12 вулканических взрывов на высоту от 1.5 до 4.5 км н.у.м. Наиболее интенсивно эксплозивная активность вулкана наблюдалась 14 и 15 августа, в эти дни отмечено наибольшее количество выбросов на максимальную высоту. Площадь пепловых облаков оценивалась в 10 417.9 км², при этом их удаление достигало 215 км в юго-восточном направлении. Произошедшее событие было схоже с предыдущими извержениями вулкана в 2013–2017 гг.

4. На влк. Пик Сарычева с декабря 2020 по февраль 2021 г. наблюдалось эффузивное извержение: фиксировалось заполнение кратера лавой, после чего произошло ее излияние по северо-западному склону постройки. В 2021 г. активность вулкана проявилась несколькими эпизодами эксплозивного характера: 29 июня, 1 июля, 6 августа и 26 ноября 2021 г. зарегистрированы единичные, относительно слабые выбросы на высоту около 2.2–3 км н.у.м.

Дистанционный мониторинг является достаточно эффективным и при этом единственным доступным инструментом наблюдения за действующими вулканами Курильских остро-

вов. Для реализации прогностических задач необходимо создание полноценной системы мониторинга вулканической активности, включающей пункты наземных геофизических наблюдений (сеть радиотелеметрических сейсмо- и TILT/GPS-станций), которые будут независимо от погодных условий и времени суток осуществлять передачу данных о состоянии вулcano-магматической системы в режиме реального времени.

Список литературы

1. Горшков Г.С. 1967. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 287 с.
2. Сноу Г. 1992. Записки о Курильских островах. *Краеведческий бюллетень*, 1: 89–127.
3. Полонский А.С. 1994. Курилы. *Краеведческий бюллетень*, 3: 3–86.
4. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В., Гурьянов В.Б. 2017. Вулканическая активность на Курильских островах в XXI в. *Вестник ДВО РАН*, 1: 51–62.
5. Лупян Е.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Бартаев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. 2015. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 12(5): 263–284.
6. Ефремов В.Ю., Гирина О.А., Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Матвеев А.М., Мельников Д.В., Прошин А.А., Сорокин А.А., Флитман Е.В. 2012. Создание информационного сервиса «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил». *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 9(5): 155–170.
7. Гордеев Е.И., Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Уваров И.А., Бурцев М.А., Романова И.М., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Королев С.П., Верхотуров А.Л. 2016. Информационная система VOLSATVIEW для решения задач мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил. *Вулканонология и сейсмология*, 6: 1–16.
8. Valade S., Ley A., Massimetti F., D'Hondt O., Laiolo M., Coppola D., Loibl D., Hellwich O., Walter T.R. 2019. Towards global volcano monitoring using multisensor sentinel missions and artificial intelligence: The MOUNTS monitoring system. *Remote Sensing*, 11: 1528. <https://doi.org/10.3390/rs11131528>
9. Котенко Т.А., Котенко Л.В., Сандиминова Е.И. и др. 2010. Извержение вулкана Эбеко в январе–июне 2009 г. (о. Парамушир, Курильские острова). *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(15): 56–68.
10. Меньяйлов И.А., Никитина Л.П., Будников В.А. 1992. Активность вулкана Эбеко в 1987–1991 гг.: характер извержений, особенности их продуктов, опасность для г. Северо-Курильск. *Вулканонология и сейсмология*, 5–6: 21–33.
11. Belousov A., Belousova M., Auer A. et al. 2021. Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebe-ko volcano, Northern Kuriles. *Bull. of Volcanology*, 83(4). <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z>

12. *Новейший и современный вулканизм на территории России*. 2005. М.: Наука, 604 с.
13. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. 2020. Вулканическая активность на Курильских островах в 2019 г. *Геосистемы переходных зон*, 4(1): 93–102. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.093-102>
14. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В. 2018. Мониторинг вулканической активности на Курильских островах: 15 лет деятельности группы SVERT. *Геосистемы переходных зон*, 2(3): 259–266. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.259-266>
15. Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В. 2018. Извержение вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2016–2017 гг. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(37): 32–42.
16. Фирстов П.П., Котенко Т.А., Акбашев Р.Р. 2020. Усиление эксплозивной активности вулкана Эбеко в апреле–июне 2020. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(46): 10–15. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-2-46-10-15>
17. Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Макаров Е.О., Котенко Т.А., Будилов Д.И., Лобачева М.А. 2020. Комплексный мониторинг извержения вулкана Эбеко (о. Парамушир, Россия) в конце 2018 г. – начале 2019 г. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(45): 89–99. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-3-43-89-99>
18. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. 2020. Активизация вулкана Эбеко в мае–июле 2020 г. (о. Парамушир, Северные Курилы). *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 500–505. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.500-505>
19. Иванов Б.В., Кирсанов И.Т., Хренов А.П., Чирков А.М. 1979. Действующие вулканы Камчатки и Курильских островов в 1978–1979 гг. *Вулканология и сейсмология*, 6: 94–100.
20. Rybin A.V., Karagusov Y.V., Izbekov P.E. et al. 2004. Monitoring of active volcanoes of the Kurile Islands: Present and future. In: *The 2nd International Conference on Volcanic Ash and Aviation Safety, June 21–24, Washington, USA*, p. 55–61.
21. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В. 2017. Активность вулкана Чиринкотан (о. Чиринкотан, Северные Курильские острова) в 2013–2016 гг. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 14(4): 76–84. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-76-84>
22. Чибисова М.В., Рыбин А.В., Дегтерев А.В. 2018. Извержение вулкана Чиринкотан в 2017 году по спутниковым данным Himawari-8. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 15(4): 112–118. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-112-118>
23. Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Кашницкий А.В., Уваров И.А., Романова И.М., Сорокин А.А., Мальковский С.И., Королев С.П., Крамарева Л.С. 2021. Спутниковый мониторинг эксплозивного извержения вулкана Чиринкотан (Северные Курилы) в 2021 г. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 18(5): 321–327. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-321-327>
24. Дегтерев А.В., Чибисова М.В., Жарков Р.В. 2021. Активность вулканов Чиринкотан и Пик Сарычева в 2021 г. (Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 5(4): 354–360. <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.4.354-360>
25. Андреев В.Н., Шанцер А.Е., Хренов А.П. и др. 1978. Извержение вулкана Пик Сарычева в 1976 г. *Бюл. вулканологических станций*, 55: 35–40.
26. Шилов В.Н. 1962. Извержение вулкана Пик Сарычева в 1960 году. *Труды СахКНИИ*, 12: 143–149.
27. Rybin A., Chibisova M., Webley P. et al. 2011. Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak volcano, Matua Island, Central Kuriles. *Bull. of Volcanology*, 73(4): 40–56. <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0481-0>
28. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. 2021. Активизация вулкана Пик Сарычева в 2020–2021 гг. (Магуа, Центральные Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 5(2): 167–171. <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.2.167-171>

References

1. Gorshkov G.S. 1967. [Volcanism of the Kuril island arc]. Moscow: Nauka, 287 p. (In Russ.).
2. Snou G. 1992. Zapiski o Kuril'skih ostrovah [Notes on the Kuril Islands]. *Krayevedcheskiy byulleten'*, 1: 89–127. (In Russ.).
3. Polonskiy A.S. 1994. Kurily [The Kurils]. *Krayevedcheskiy byulleten'*, 3: 3–86.
4. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degtarev A.V., Guryanov V.B. 2017. Volcanic eruptions in the Kuril Islands during XXI century. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 1: 51–62. (In Russ.).
5. Loupian E.A., Bourtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Suchugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A. 2015. IKI Center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 12(5): 263–284. (In Russ.).
6. Efremov V.Yu., Girina O.A., Kramareva L.S., Loupian E.A., Manevich A.G., Matveev A.M., Mel'nikov D.V., Proshin A.A., Sorokin A.A., Flitman E.V. 2012. Creating an Information Service “Monitoring of active volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands”. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 9(5): 155–170. (In Russ.).
7. Gordeev E.I., Girina O.A., Lupyan E.A., Sorokin A.A., Kramareva L.S., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Uvarov I.A., Burtsev M.A., Romanova I.M., Mel'nikov D.V., Manevich A.G., Korolev S.P., Verkhoturov A.L. 2016. The VolSat-View information system for monitoring the volcanic activity in Kamchatka and on the Kuril Islands. *J. of Volcanology and Seismology*, 10(6): 382–394. <https://doi.org/10.1134/s074204631606004x>
8. Valade S., Ley A., Massimetti F., D'Hondt O., Laiolo M., Coppola D., Loibl D., Hellwich O., Walter T.R. 2019. Towards global volcano monitoring using multisensor sentinel missions and artificial intelligence: The MOUNTS monitoring system. *Remote Sensing*, 11: 1528. <https://doi.org/10.3390/rs11131528>
9. Kotenko T.A., Kotenko L.V., Stanimirova E.I. et al. 2010. The eruption of the Ebeko volcano in January – June 2009 (Paramushir Island, Kuril Islands). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, 1(15): 56–68. (In Russ.).
10. Menyajlov I.A., Nikitina L.P., Budnikov V.A. 1992. [Activity of Ebeko volcano in 1987–1991: eruption character, their product features, danger for the city of Severo-Kurilsk]. *Volcanology and Seismology*, 5-6: 21–33. (In Russ.).
11. Belousov A., Belousova M., Auer A. et al. 2021. Mechanism of the historical and the ongoing vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles. *Bull. of Volcanology*, 83(4). <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z>
12. Noveyskiy i sovremennyy vulkanizm na territorii Rossii [The latest and modern volcanism in Russia]. 2005. Moscow: Nauka, 604 p.

13. Degtyarev A.V., Chibisova M.V. **2020**. Volcanic activity on the Kuril Islands in 2019. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 1(4): 93–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.093-102>
14. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V. **2018**. Monitoring of volcanic activity in the Kurile Islands: 15 years of work SVERT group. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 259–266. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.259-266>
15. Kotenko T.A., Sandimirova E.I., Kotenko L.V. **2018**. Eruptions of the Ebeko volcano (Kuril Islands) in 2016–2017. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(37): 32–42 (In Russ.).
16. Firstov P.P., Kotenko T.A., Akbashev R.R. **2020**. Growth of explosive activity of Ebeko volcano in April–June 2020. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 2(46): 10–15 (In Russ.).
17. Firstov P.P., Akbashev R.R., Makarov E.O., Kotenko T.A., Budilov D.I., Lobacheva M.A. **2020**. Geophysical observations of the Ebeko volcano's eruption (Paramushir Island, Russia) over the period September 2018 – April 2019. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(45): 89–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-3-43-89-99>
18. Degterev A.V., Chibisova M.V. **2020**. Activation of the Ebeko volcano in May–July, 2020 (Paramushir Island, Northern Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 500–505. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.500-505>
19. Ivanov B.V., Kirsanov I.T., Khrenov A.P., Chirkov A.M. **1979**. [Active volcanoes of Kamchatka and Kuril Islands in 1978–1979]. *Vulkanologiya i seismologiya*, 6: 94–100. (In Russ.).
20. Rybin A.V., Karagusov Y.V., Izbekov P. E. et al. **2004**. Monitoring of active volcanoes of the Kurile Islands: Present and future. In: *The 2nd International Conference on Volcanic Ash and Aviation Safety, June 21–24, Washington, USA*, p. 55–61.
21. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V. **2017**. Activity of Chirinkotan volcano (Chirinkotan Isl., the Northern Kuriles) in 2013–2016. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 14(4): 76–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-76-84>
22. Chibisova M.V., Rybin A.V., Degterev A.V. **2018**. The eruption of Chirinkotan volcano in 2017 according to Himawari-8 satellite data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 15(4): 112–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-112-118>
23. Girina O.A., Manevich A.G., Melnikov D.V., Nuzhdaev A.A., Kashnitskiy A.V., Uvarov I.A., Romanova I.M., Sorokin A.A., Malkovsky S.I., Korolev S.P., Kramareva L.S. **2021**. Satellite monitoring of the explosive eruption of Chirinkotan volcano (Northern Kuriles) in 2021. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 18(5): 321–327. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-321-327>
24. Degterev A.V., Chibisova M.V., Zharkov R.V. **2021**. Activity of Chirinkotan and Sarychev Peak volcanoes in 2021 (Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 5(4): 354–360. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.4.354-360>
25. Andreev V.N., Shancer A.E., Khrenov A.P. et al. **1978**. [Eruption of Sarychev Peak volcano in 1976]. *Bull. of the Volcanological Stations*, 55: 35–40. (In Russ.).
26. Shilov V.N. **1962**. [Eruption of Sarychev Peak volcano in 1960]. *Trudy SakhKNII*, 12: 143–149. (In Russ.).
27. Rybin A., Chibisova M., Webley P. et al. **2011**. Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak volcano, Matua Island, Central Kuriles. *Bull. of Volcanology*, 73(4): 40–56. <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0481-0>
28. Degterev A.V., Chibisova M.V. **2021**. Activation of Sarychev Peak Volcano in 2020–2021 (Matua Isl., the Central Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 5(2): 167–171. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.2.167-171>

Об авторах

Сотрудники лаборатории вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск:

Дегтерев Артем Владимирович (<https://orcid.org/0000-0001-8291-2289>), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, d_a88@mail.ru

Чибисова Марина Владимировна (<https://orcid.org/0000-0003-0677-6945>), старший научный сотрудник, m.chibisova@imgg.ru

Поступила 15.07.2022
После доработки 01.08.2022
Принята к печати 05.08.2022

About the Authors

Employees of the Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk:

Degterev, Artem V. (<https://orcid.org/0000-0001-8291-2289>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, d_a88@mail.ru

Chibisova, Marina V. (<https://orcid.org/0000-0003-0677-6945>), Senior Researcher, m.chibisova@imgg.ru

Received 15 July 2022
Revised 1 August 2022
Accepted 5 August 2022



Динамика растительности юга Приморья при климатической ритмике малого ледникового периода

М. С. Лящевская*, Л. А. Ганзей

*E-mail: lyshevskay@mail.ru

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Реферат. Выделено шесть этапов развития растительности на основе палинологического изучения пойменных отложений р. Цукановка (южное Приморье). Первый этап является переходным от средневекового теплого периода, следующие четыре этапа сопоставимы с климатическими фазами малого ледникового периода (МЛП), шестой приходится на современное потепление в XX в., во время которого произошло становление современных ландшафтов при участии антропогенного фактора. Причиной возникновения МЛП является специфическое развитие комплекса атмосферно-гидросферных процессов, развивавшихся под непосредственным влиянием долговременных вариаций солнечной активности. Наиболее холодная фаза на территории южного Приморья пришлась на конец XVII в. и совпала с Маундеровским гранд-минимумом солнечной активности (1645–1715 гг.), для нее также характерно снижение увлажнения. Развитие лесной растительности в долине р. Цукановка зафиксировало чередование теплых и холодных эпизодов в течение МЛП. В относительно теплые фазы в составе лесной растительности южного Приморья увеличивалось участие дуба и других широколиственных, а в холодные – возрастала доля ольхи. В первой половине XVI в. на территории южного Приморья за счет роста атмосферных осадков повышается увлажнение. Корреляция палеоклиматических ритмов во время МЛП для южного Приморья, выделенных на основе результатов спорово-пыльцевого анализа, с дендрохронологическими данными по южному Сихотэ-Алиню и другим районам Северного полушария, а также с историческими свидетельствами соседнего Китая показала синхронность наступления климатических событий в регионах, что отражает их глобальную природу и масштаб.

Ключевые слова: спорово-пыльцевой анализ, растительность, Сихотэ-Алинь, Северное полушарие, малый ледниковый период, минимумы солнечной активности

Dynamics of vegetation of the southern Primorye during the climatic rhythm of the Little Ice Age

Marina S. Lyashchevskaya*, Larisa A. Ganzey

*E-mail: lyshevskay@mail.ru

Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. Six stages of vegetation development have been identified on the basis of a palynological study of floodplain deposits of the Tsukanovka River (southern Primorye). The first stage is transitional from the medieval warm period, the next four stages are comparable with the climatic phases of the Little Ice Age. The sixth stage in the development of vegetation reflects the modern warming in the 20th century, when modern landscapes have been formed with the participation of the anthropogenic factor. The specific development of a complex of atmospheric-hydrospheric processes, which developed under the direct influence of long-term variations in solar activity, was the reason for the emergence of the Little Ice Age. The coldest phase in the territory of southern Primorye occurred at the end of the 17th century and coincided with the Maunder Grand Minimum of solar activity (1645–1715), it is also characterized by a decrease in humidity. The development of forest vegetation in the valley of the Tsukanovka River recorded alternating warm and cold episodes during the Little Ice Age. In relatively warm phases, the proportion of oak and other broad-leaved trees increased in the forest vegetation in southern Primorye, while in cold phases the proportion of alder increased. In the first half of the XVI century on the territory of southern Primorye, an increase in humidity due to an increase in precipitation is noted. The correlation of paleoclimatic rhythms identified on the basis of spore-pollen analysis results during the Little Ice Age in southern Primorye, with dendrochronological data for the southern Sikhote-Alin and other regions of the northern hemisphere, as well as with historical evidence from neighboring China, has showed the synchronism of the onset of climatic events in the regions, which reflects their global nature and global scale.

Keywords: pollen analysis, vegetation, Sikhote-Alin, Northern Hemisphere, Little Ice Age, solar activity minimum

Для цитирования: Лящевская М.С., Ганзей Л.А. Динамика растительности юга Приморья при климатической ритмике малого ледникового периода. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 3, с. 206–217. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.206-217>; <https://www.elibrary.ru/fhfvcv>

For citation: Lyashchevskaya M.S., Ganzey L.A. Dynamics of vegetation of the southern Primorye during the climatic rhythm of the Little Ice Age. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 206–217. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.206-217>; <https://www.elibrary.ru/fhfvcv>

Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам и Екатерине Петровне Кудрявцевой (Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток) за полезные и продуктивные комментарии, которые способствовали значительному улучшению рукописи.

Acknowledgements

Authors express their deep gratitude to the Reviewers and Ekaterina P. Kudryavtseva (Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok) for the useful and productive comments that contributed to the significant improvement of the manuscript.

Введение

Одной из первоочередных задач в глобальной повестке дня является изучение последствий изменения климата. Даже незначительные изменения температур могут стать причиной целого ряда опасных природных явлений [1]. Чтобы смоделировать эти последствия и дать прогноз в отношении климата в будущем, необходимо изучать влияние климата прошлых эпох на ландшафты, динамику ледников, площади их распространения.

Одним из недавних кратковременных похолоданий, имевших глобальный характер, считается малый ледниковый период (МЛП), как наиболее холодный по среднегодовым температурам за последние 2 тыс. лет [2]. Его наступление произошло после средневековой климатической аномалии (VIII–XIII вв.). Признаками похолодания явились понижение температуры воздуха, увеличение ледовитости Северной Атлантики и морей Арктики, раннее замерзание и позднее вскрытие рек, продвижение к югу многолетней мерзлоты, рост ледников [1, 3]. Период имел собственные флуктуации, похолодание не происходило постепенно год от года, а выражалось в резком увеличении числа необычных природных явлений, усилении межсезонной изменчивости, длительности особо опасных метеорологических событий [1]. Мнения ученых о времени начала и продолжительности МЛП значительно разнятся [4]. Согласно «расширенной версии», это начало–середина XIV в. – первая половина XIX в., «суженная версия» сопоставляет похолодание с Маундеровским гранд-минимум солнечной активности в период 1645–1715 гг. [5, 6].

Данные дендрохронологических исследований, позволяющие значительно детализировать погодно-климатические условия, указывают, что комфортность произрастания

древостоев, зависящая от смены потеплений/похолоданий (комплексного влияния таких факторов, как инсоляция земной поверхности, влажность среды и вариации концентрации CO₂ в атмосфере), существенно менялась в течение МЛП, при этом фазы длительных похолоданий превышали продолжительность солнечных гранд-минимумов [3]. Следовательно, похолодания были обусловлены комплексом причин, из которых помимо низкой солнечной активности выделяют также пониженную активность Гольфстрима, извержения вулканов [7], ослабление субтропического тихоокеанского антициклона и другие атмосферно-гидросферные процессы [3].

Для Северного полушария, согласно дендрохронологическим данным, период 1200–1800 гг. характеризуется снижением летней инсоляции и понижением среднегодовой температуры на 1–2 °С [8]. По сравнению с максимумом последнего оледенения, когда средняя температура воздуха понижалась на 8 °С, МЛП не привел к существенному изменению ландшафтов, но стал причиной демографического, социального и хозяйственного кризисов. Так, уменьшение суммы активных температур сократило сроки вегетации культивируемых растений, что снизило урожайность, поголовье скота и привело к голоду среди бедных слоев населения [1, 9].

Таким образом, изучение природных условий МЛП в разных регионах Северного полушария приобретает особое значение. Сводного исследования природных условий Приморского края в МЛП нет, данные вопросы в литературе по региону освещены фрагментарно [10–13]. В связи с этим с целью реконструкции природно-климатических условий в южном Приморье в течение МЛП с помощью спорово-пыльцевого и радиоуглеродного анализов были изучены пойменные отложения

р. Цукановка (южное Приморье) и проведено сравнение с данными по дендрохронологии для южного Сихотэ-Алиня [10] и Северного полушария между 40° и 75° с.ш. [8] (далее под Северным полушарием имеем в виду этот район), а также с историческими свидетельствами соседнего Китая [9, 14].

Краткая характеристика района

Река Цукановка берет начало в Черных горах, которые образуют естественную границу между Россией (Хасанский район, Приморье) и КНР и относятся к системе Восточно-Маньчжурских гор. В нижнем течении р. Цукановка протекает по слабонаклонной аккумулятивной равнине и впадает в мелководную обширную бухту Экспедиции зал. Посыет (Японское море) (рис. 1). Основные элементы рельефа в береговой зоне бухты Экспедиции сформировались во время максимальных фаз трансгрессий позднего плейстоцена и голоцена, а также и в течение последующих разноамплитудных колебаний уровня Японского моря. Лугово-болотные почвы на аккумулятивной рав-

нине образовались после падения уровня моря в среднем голоцене на месте бывшей лагуны с илистым дном в условиях длительного переувлажнения. В отдельные годы переувлажнение могло наблюдаться в течение почти всего вегетационного периода [15]. В формировании верхней части террасы принимали участие паводковые (аллювиальные) наносы.

Климат района – умеренный муссонный. Зимой преобладает малооблачная погода, ветер с материка приносит с северо-запада холодные воздушные массы. В первой половине лета преобладает пасмурная погода, во второй – облачная и ясная. Летом дуют ветры восточных и южных направлений, несущие влажный воздух с океана. Среднегодовая температура воздуха +6.7 °С, средняя температура января –9.5 °С, самого теплого месяца августа +22.6 °С. Вегетационный период достигает 200 дней в году и является одним из самых длинных в Приморье. Среднегодовое количество осадков колеблется в пределах 600–800 мм, подавляющее большинство их приходится на теплую половину года [16, 17].



Рис. 1. Район работ на юге Приморья и Сихотэ-Алине. (а) расположение мест сравниваемых палеореконов: 1 – местоположение изученного разреза (9214), 2 – южный Сихотэ-Алинь [10], 3 – центральный Сихотэ-Алинь [11]; (б) местоположение разреза в долине р. Цукановка; (в) долина р. Цукановка в нижнем течении.

Fig. 1. Study area in the southern Primorye and Sikhote-Alin mountain range. (a) location of the compared paleoconstructions: 1 – location of the studied section (9214), 2 – Southern Sikhote-Alin [10], 3 – Central Sikhote-Alin [11]; (b) location of the section in the Tsukanovka River valley; (c) Tsukanovka River valley low course.

Благодаря своеобразному климату юго-западная часть южного Приморья является одним из наиболее богатых и своеобразных во флористическом отношении районов [18]. Так, в верховьях р. Цукановка выявлен наиболее сохранившийся участок природного ландшафта с редкими и реликтовыми видами растений, представленный дубняком рододендровым из *Quercus dentate* с рододендром Шлиппенбаха *Rhododendron schlippenbachii* и леспедецей плотнокистевой *Lespedeza cyrtobotrya*. Подобный ландшафт встречается в Приморье только на крайнем юге юго-западного Приморья [19].

В настоящее время здесь наблюдается значительная антропогенная трансформация растительного покрова. Под влиянием вырубок и пожаров леса останцовых возвышенностей и придолинных увалов деградируют, превращаясь в бедные видами, малоценные вторичные дубняки, и далее – в безлесные пустоши. В составе древесного яруса дубового леса присутствуют липы, береза даурская *Betula dahurica*, клен мелколистный *Acer mono*, маакия амурская *Maackia amurensis*. Хорошо развит подлесок и травяной ярус. Средний возраст насаждений составляет 50–60 лет. Отмечены следы многократных низовых пожаров. На равнинных участках (нижнее течение Цукановки) в местах интенсивного освоения территории развит кустарниковый тип растительности. На луговой террасе р. Цукановка произрастает пойменный лес. На участке, образованном на месте залива, существовавшего на пике голоценовой трансгрессии, днище реки заболочено. Здесь развиты сырые и периодически переувлажненные луга с вейником, осокой и злаками.

Материалы и методы

В нижнем течении р. Цукановка по левому берегу в обнажениях берегового обрыва был зачищен разрез 9214, координаты: 42°41'48.18 с.ш., 130°46'04.32 в.д., абсолютная высота над уровнем моря – 5 м. (рис. 1). Мощность разреза составила 195 см. С шагом в 5 см были отобраны образцы на спорово-пыльцевой анализ, в интервале 135–140 см – на радиоуглеродный. Ниже приводится описание разреза:

0–10 см супесь светло-коричневая, слабо гумусированная, с примесью мелко- и среднезернистого песка;

10–34 см супесь светло-коричневая, с примесью мелкозернистого песка;

34–90 см переслаивание супеси светло-коричневой с суглинком;

90–120 см переслаивание слабо гумусированного суглинка с супесью и песком;

120–135 см суглинок коричневый, слабо гумусированный, плотный;

135–155 см суглинок темно-коричневый, гумусированный, плотный с затеками более светлого суглинка, граница волнистая с языками;

155–195 см переслаивание линз коричневых суглинков и светло-коричневых, желтоватых песков, граница волнистая, с языками.

Изучались также субфоссильные спорово-пыльцевые спектры наилок р. Цукановка. Образцы для пыльцевого анализа обрабатывали по сепарационному методу Гричука [20]. Микроскопические исследования выполнены с помощью биологического микроскопа Zeiss Axio Imager.A2. Определение пыльцы и спор проводилось по их морфологическим особенностям с использованием палинологической базы данных [21], атласов и определителей [22–24]. В образцах было подсчитано не менее 300 пыльцевых зерен и спор. При подсчете процентов за 100 % принималась сумма пыльцы древесных и травянистых растений, а содержание спорных считали от общей суммы. Для построения диаграмм было использовано программное обеспечение Tilia v. 2-0-41 [25].

Радиоуглеродная датировка для палинокомплекса 2 получена в лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана Санкт-Петербургского государственного университета по стандартной методике [26].

Результаты

Палиноспектры из современных наилок р. Цукановка с преобладанием пыльцы травянистых (58 %) отвечают развитию луговой растительности. Содержание пыльцы осок (Cyperaceae) до 27 %, полыни (*Artemisia* sp.) до 14 %. Присутствует большое количество аллохтонной пыльцы, представленной в основном (до 23 %) сосной густоцветковой *Pinus densiflora*, насаждения которой сохранились как в естественных ценозах Хасанского района Приморского края, так и в посадках, вы-

полненных в 1900–1910 гг. в пос. Безверхово, в бухте Витязь и в районе п-ова Гамова [27]. Небольшое содержание пыльцы черемухи обыкновенной *Prunus padus* (до 5 %), ольхи волосистой *Alnus hirsuta* (до 2 %) и ивовых (*Salicaceae*) (до 1 %) отражает развитие куртин долинных лесов. Наличие пыльцы берез: маньчжурской *Betula mandshurica* (до 3 %) и даурской *B. dahurica* (до 1 %), дуба (до 2 %), ореха маньчжурского *Juglans mandshurica* и граба сердцелистного *Carpinus cordata* (по 1 %) говорит о присутствии широколиственных лесов (без участия хвойных пород), представленных в основном дубняками на склонах возвышенностей и увалах. Состав субфоссильных спорово-пыльцевых спектров территории, прилегающей к разрезу 9214, хорошо согласуется со спорово-пыльцевыми спектрами современных отложений побережья юго-западного Приморья [28], для которых также характерно высокое, намного превышающее степень участия в растительном покрове содержание пыльцы сосны густоцветковой – высокопродуктивной ветроопыляемой породы.

Палинокомплекс 1 (интервал 155–195 см) характеризуется доминированием пыльцы трав и кустарничков (до 57 %) и соответствует луговой растительности. В нижней части (интервал 185–195 см) преобладание спор папоротников (до 52 %) указывает на влияние паводковых вод в формировании отложений. Количество пыльцы деревьев и кустарничков в спектрах постепенно увеличивается снизу вверх до 18 %. Среди древесных пород доминирует пыльца ольхи волосистой (до 13 %), в меньшем количестве содержится пыльца дуба и черемухи обыкновенной *Prunus padus* (до 7 %), березы маньчжурской (до 5 %), ели (*Picea* sp.) (до 4 %), сосны густоцветковой (до 3 %), лещины (*Corylus* sp.) (до 2 %), количество других таксонов не превышает 1 %. Среди травянистой пыльцы преобладает пыльца полыни (до 40 %), содержание остальных составляет: кровохлебка мелкоцветковая *Sanguisorba parviflora* до 18 % в нижней части отложений, тростник южный *Phragmites australis* и василистник (*Thalictrum* sp.) до 11 %, лютиковые (*Ranunculaceae*) до 10 %, астровые (*Asteraceae*) до 8 %, осоковые (*Cyperaceae*) до 7 % маревые (*Chenopodiaceae*) до 5 %, норичниковые (*Scrophulariaceae*) до 4 %, зонтичные (*Apiaceae*) до 3 %, гречишные (*Polygonaceae*)

и чина волосистая *Lathyrus pilosus* до 2 %, доля остальных таксонов не превышает 1 %.

Палинокомплекс 2 (интервал 95–155 см): увеличение содержания пыльцы трав до 71 % и уменьшение доли спор до 11 %. Максимальное количество древесной пыльцы составляет 38 %, в ней доминирует пыльца ольхи (от 5 до 41 % от суммы всей пыльцы). Доля других пород: березы маньчжурской до 6 %, березы даурской до 3 %, дуба и черемухи до 5 %, сосны густоцветковой до 4 %, остальные – ≤1 %. В группе трав преобладает пыльца полыни (до 40 %), ее количество снижается в верхней толще отложений. Содержание других: тростника до 12 %, василистника до 11 %, осок до 10 % с постепенным увеличением, снизу вверх, лютиковых до 9 %, астровых до 8 %, чины до 6 %, норичниковых до 3 %, герани (*Geranium* sp.), кровохлебки, гречишных и маревых до 2 %, остальные – ≤1 %. Из слоя отложений (135–140 см) была получена радиоуглеродная дата: 410 ± 80 ¹⁴C л.н., 1521 ± 81 AD (ЛУ-8035).

Палинокомплекс 3 (интервал 85–95 см): увеличение количества древесной пыльцы (до 32 %) и значительное сокращение доли пыльцы дуба – до <1 %. В составе спектров резко возрастает содержание пыльцы ольхи (до 35 %), уменьшается количество пыльцы березы маньчжурской до 2 %, доля сосны могильной и черемухи – до 3 %, до 2 % увеличивается содержание пыльцы ореха маньчжурского, количество остальных пород – ≤1 %. В группе трав и кустарничков (до 47 %) доминирует пыльца полыни (до 27 %), в меньшем объеме присутствует пыльца василистника (до 9 %), тростника (до 7 %), астровых и лютиковых (до 6 %), осок (до 4 %), гречишных и чины (до 3 %), кровохлебки и колокольника уссурийского *Codonopsis ussuriensis* (до 2 %), остальные – ≤1 %. Среди споровых (до 25 %) преобладают папоротники (*Polypodiaceae*).

Палинокомплекс 4 (интервал 45–85 см): уменьшение доли пыльцы деревьев и кустарничков до 19 %. Доминирует пыльца ольхи, причем ее содержание варьирует от 5 до 24 %. Постепенно увеличивается снизу вверх количество пыльцы березы маньчжурской (до 7 %) и, наоборот, постепенно снижается процент пыльцы сосны густоцветковой. Доля пыльцы березы даурской – до 4 %, дуба до 9 %, черемухи до 4 %. Возрастает содержание пыльцы ши-

роколиственных: лещины, ореха маньчжурского и липы (*Tilia* sp.) – до 2 % каждого таксона, появляется пыльца аралии (*Aralia* sp.) (до 2 %). В группе трав и кустарничков (до 50 %) преобладает пыльца полыни (до 33 %). Количество других: пыльца осок постепенно уменьшается снизу вверх до 6 %, тростника до 10 %, лютиковых до 9 %, василистника до 8 %, астровых и маревых до 7 %, гречишных до 6 %, норичниковых до 4 %, кровохлебки, зонтичных, чины и черноголовки азиатской *Prunella asiatica* – до 2 %, остальных ≤ 1 %. Среди спор лидируют папоротники (до 40 %).

Палинокомплекс 5 (интервал 20–45 см): постепенное увеличение содержания пыльцы деревьев и кустарников до 42 %. На долю трав приходится до 48 %, споровых – до 34 % с постепенным понижением снизу вверх до 18 %. Среди древесной пыльцы доминирует пыльца ольхи, причем ее количество возрастает снизу вверх до 42 % от суммы всей пыльцы. Содержание остальных пород составляет: березы маньчжурской до 6 %, березы даурской до 2 %, дуба и черемухи до 4 %, липы до 2 %, сосны густоцветковой до 3 %, остальных – ≤ 1 %. В группе трав и кустарничков преобладает пыльца полыни (до 40 % с постепенным снижением до 18 %). В меньшем объеме присутствует пыльца осок (до 12 %), лютиковых (до 8 %), тростника (до 7 %), кровохлебки (до 6 %), астровых, василистника и чины (до 5 %), колокольника (до 4 %), зонтичных, гречишных и норичниковых (до 2 %), остальных ≤ 1 %.

Палинокомплекс 6 (интервал 0–20 см): увеличение доли трав до 59 % в общем составе спектров. Количество древесной пыльцы сначала уменьшается до 14 %, а потом возрастает в два раза. Содержание спор увеличивается до 32 %, затем постепенно снижается до 12 %. В группе деревьев и кустарников доминирует пыльца сосны густоцветковой (до 29 %). В меньшем количестве присутствует пыльца черемухи (до 5 %), дуба (до 4 %), березы маньчжурской (до 3 %), березы даурской, ели и сосны корейской *Pinus koraiensis* (до 2 %), остальные ≤ 1 %. Среди травянистой пыльцы преобладает пыльца осок (до 27 %) и полыни (постепенно снижается снизу вверх с 26 до 14 %). Доля других составляет: астровых до 10 %, лютиковых до 7 %, тростника уменьшается снизу вверх до 2 %, норичниковых

до 4 %, остальные ≤ 1 %. В группе споровых до 4 % возрастает содержание спор чистоуста азиатского *Osmunda asiatica*.

Обсуждение

Разрез 9214 содержит подробную информацию об изменении природной среды начиная с XIV в. по настоящее время. Анализ пыльцевых данных позволил выделить 6 фаз развития растительности, соответствующих климатическим колебаниям.

Фаза 1 относительно теплая, относится к XIV в. и оканчивается в первой половине XV в. Считается, что в этот период средневековые температуры были ниже, чем во время средневековой климатической аномалии (VIII–XIII вв.). В составе растительности долинных сообществ постепенно возрастает участие широколиственных пород и особенно дуба (ПК 1, рис. 2). Данные по реконструкции летней температуры воздуха суши Северного полушария между 40° и 75° с.ш. на основе годовых колец свидетельствуют о теплой аномалии с 1425 по 1434 г. [8]. Результаты, полученные при изучении отложений оз. Нижнее в центральном Сихотэ-Алине, также зафиксировали теплый эпизод 530–500 кал. л.н. по увеличению доли фитопланктона и понижению доли арктобореальных диатомей [11]. Комплексное изучение отложений юго-западного побережья Приморья зафиксировало климатические условия немного прохладнее и влажнее современных в интервале с XIII по XV в. Распространялись дубовые леса и березняки, осоковые и разнотравные луга, в горах – кедрово-широколиственные леса [21].

Фазу 2 характеризует общий тренд похолодания на территории южного Приморья. В составе окружающей растительности уменьшается доля дуба (ПК 2, рис. 2). Возможно, что ухудшение климатических условий произошло во время минимума солнечной активности Шпёрера, 1450–1540 гг. [2], после окончания теплой аномалии (1425–1434 гг.), зафиксированной в Северном полушарии по данным дендрохронологии. Холодные температурные аномалии в Северном полушарии, по данным дендроклиматологов, имели место с 1452 по 1461 г. и с 1462 по 1471 г. [8]. Анализ исторического материала по Китаю также показывает, что холодный период начался в XV в. [9].

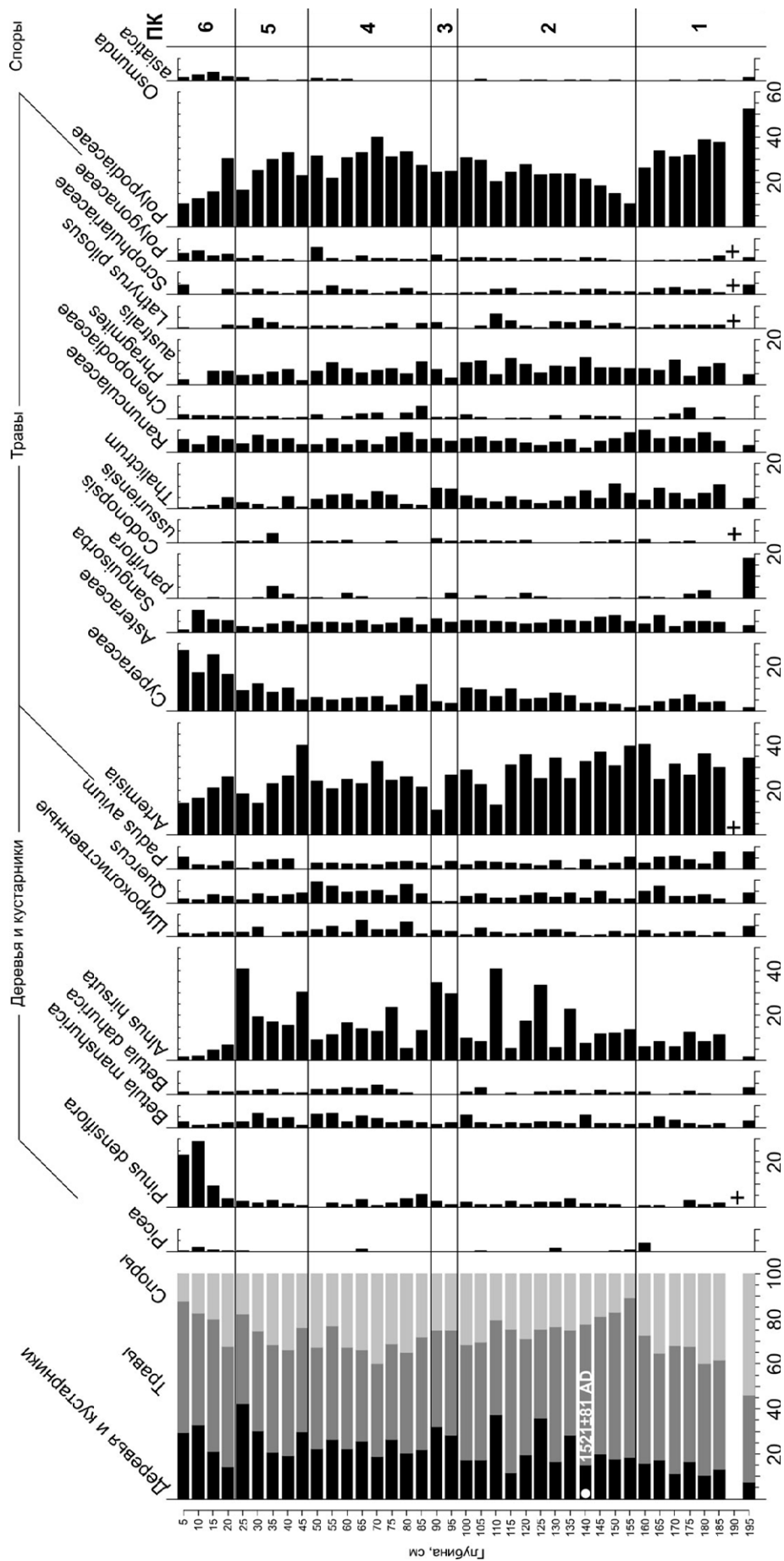


Рис. 2. Спорово-пыльцевая диаграмма пойменных отложений р. Цукановка (разрез 9214). ПК – пыльцевой комплекс; + – единично.
 Fig. 2. Pollen diagram of floodplain deposits of the Tsukanovka River (section 9214). ПК – pollen complex; + – singly.

В центральном Сихотэ-Алине при изучении отложений оз. Нижнее (470–440 кал. л.н.) также был зафиксирован пик содержания арктобореальных диатомей, свидетельствующий о холодных условиях [11]. Для южного Сихотэ-Алиня О.Н. Ухваткина с соавторами [10] на основе исследования годичных колец и минимальной температуры августа выделила следующие холодные периоды, сопоставимые с фазой 2: 1535–1540, 1550–1555, 1643–1649, 1659–1667, 1675–1689 гг., и следующие теплые температурные аномалии: 1560–1585, 1600–1610, 1614–1618 гг. Теплые эпизоды в этот временной интервал, если они имели место, на составе растительности долины р. Цукановка не отразились (ПК 2, рис. 2). Изучение отложений юго-западного побережья Приморья зафиксировало наступление наиболее холодных условий МЛП со второй половины XVI в., когда распространялись ольхово-березовые леса, осоковые и разнотравно-злаковые луга [12]. Самый холодный период фазы 2, во время которого резко сокращалось участие дуба и других широколиственных и так же резко увеличивалась доля ольхи, наступил в середине XVII в., что совпадает с выделенным для южного Сихотэ-Алиня холодным периодом 1643–1649 гг. [10]. После этого происходит некоторое улучшение теплообеспеченности и укрепление позиций дуба, липы. Примерно с 1521 г. на территории южного Приморья повышается увлажнение, в составе луговой растительности возрастает участие осок (ПК 2, рис. 2).

Фаза 3. Максимум похолодания наступает в конце XVII в. и совпадает с Маундеровским гранд-минимумом солнечной активности (1645–1715 гг.). В составе растительности до минимальных значений сокращается распространение дуба и других широколиственных и резко возрастает участие ольхи, в то же время увеличивается разнотравье, что может свидетельствовать о снижении увлажнения (ПК 3, рис. 2). В Северном полушарии, по данным дендрохронологии, холодная температурная аномалия зафиксирована в 1695–1704 гг. [8], а для южного Сихотэ-Алиня в 1675–1689 гг. [10]. Предположительно, в южном Приморье холодный эпизод мог начаться около 1680 г. и закончиться после 1704 г. Анализ исторических документов для Северо-Китайской равнины и реконструкция

зимних полугодов (с октября по апрель следующего года) рядов температур показал, что наиболее холодная фаза малого ледникового периода с 1651 по 1700 г. имела аномалию -0.83 °C [14].

В XVII в. похолодание малого ледникового периода приобрело глобальный характер, когда на наиболее низкий после V в. до н. э. уровень солнечной активности (Маундеровский минимум) наложилась пониженная активность Гольфстрима. В это время расширялись ледники в Северной Америке, Европе, замерзало Балтийское море, датские проливы и прол. Босфор. Косвенным свидетельством ухудшения климатических условий и роста ледовитости Северной Атлантики является исчезновение поселений викингов [1, 29].

Фаза 4. В изученном разрезе зафиксирован тренд повышения температуры в начале XVIII в. В составе растительности южного Приморья увеличивается количество дуба и других широколиственных, а также березы, в долинных сообществах снижается доля ольхи (ПК 4, рис. 2). Дендрохронологические данные для Северного полушария не зафиксировали в этот период теплых температурных аномалий, в отличие от результатов по южному Сихотэ-Алиню, для которого исследователи выделили следующие теплые эпизоды: 1738–1743, 1756–1759, 1776–1781 гг. [10]. Материалы по реконструкции температуры на Северо-Китайской равнине свидетельствуют об относительно теплой фазе с 1701 по 1780 г. с небольшой аномалией холода -0.36 °C относительно среднего значения 1951–1980 гг. [14].

В период 5 фазы произошло ухудшение климатических условий на территории южного Приморья, что могло быть обусловлено Далтоновским минимумом солнечной активности (1790–1830 гг.). В лесной растительности уменьшается количество дуба и других широколиственных и увеличивается доля ольхи (ПК 5, рис. 2). Для Северного полушария по данным дендрохронологии зафиксированы холодные периоды в интервалах 1812–1821 и 1832–1841 гг. [8], для южного Сихотэ-Алиня в 1791–1801, 1807–1818, 1822–1827, 1836–1852, 1868–1887, 1911–1925 гг. [10]. Результаты анализа изменения температуры на Северо-Китайской равнине показывают, что во время холодной фазы 1781–1900 гг. аномалия составила -0.60 °C [14].

Фаза 6. Потепление в южном Приморье началось в середине XX в. В составе долинных сообществ значительно уменьшается количество ольхи и берез. В результате антропогенного воздействия сокращаются площади древесной растительности и повышается увлажнение, широко распространяются сырые осоковые луга. Признаком антропогенной трансформации растительности можно также считать появление в начале XX в. посадок сосны густоцветковой в Хасанском районе [27], пыльца которой в значительных количествах появляется в ПК 6 (рис. 2). Данные дендрохронологов по Северному полушарию выделяют 3 теплые климатические аномалии в XX в.: 1946–1955, 1980–1989, 1994–2003 гг. [8], а для южного Сихотэ-Алиня одну, но достаточно длительную – с 1944 по 2014 г. [10]. Инструментальные наблюдения за температурой на Северо-Китайской равнине показывают, что после 1900 г. климат вошел в теплую фазу. Средняя температура 1901–2010 гг. была на 0.11 °C выше, чем средняя температура 1951–1980 гг. А 1996–2000 гг. были самыми теплыми в XX в., с аномалией тепла на 1.25 °C выше, чем у базового периода 1951–1980 гг., с которым проводилось сравнение [14].

За последние 100 лет (1901–2000 гг.) приземная температура воздуха Северного полушария увеличилась на 0.6 ± 0.2 °C [30, 31]. Потепление в XX в. было наибольшим за последнее тысячелетие. Есть инструментальные наблюдения о сильном потеплении в 20-е годы XX в. в Арктике. Так, в Баренцевом море с 1910 по 1928 г. температура воды увеличилась почти на 2 °C. В Северном полушарии с 1950-х годов площадь морских льдов в весенний и летний период сократилась на 10–15 %, а их толщина в конце лета – начале осени уменьшилась на 40 %. Уровень моря в XX в. повысился на 10–20 см в основном за счет теплового расширения и таяния морского льда. Начиная с 1950-х годов теплосодержание океанов повышалось. По спутниковым данным, в Северном полушарии с конца 1960-х годов площадь снежного покрова уменьшилась примерно на 10 %. По наземным данным, продолжительность ледового покрова на реках и озерах средних и высоких широт за тот же период сократилась на две недели. Повсеместно в течение XX в. наблюдалась деградация горных ледников в неполярных районах. Во второй

половине XX в. уменьшилась повторяемость экстремально низких температур и несколько увеличилась повторяемость экстремально высоких температур [32].

Потепление с конца 1970-х годов по начало 2000-х годов отмечено и для морской акватории Японского моря, температура вод в центральной части Японского моря возросла на ~4 °C. Усиление адвекции субтропических вод Восточно-Корейского течения в район южного Приморья обусловило тренд к повышению численности тропических и субтропических животных и рыб в северо-западной части Японского моря и повышению температуры вод в зал. Петра Великого в ноябре–декабре [33, 34].

Заключение

В результате палинологического изучения пойменных отложений р. Цукановка было выделено 6 фаз развития растительности, соответствующих климатическим колебаниям, начиная с XIV в. н.э. по настоящее время. На территории южного Приморья ухудшение климата, связанное с наступлением малого ледникового периода, началось в первой половине XV в. и длилось по начало XX в. Короткопериодичная климатическая ритмика проявилась двумя фазами похолодания: 1) первая половина XV в. – начало XVIII в., с максимумом похолодания в конце XVII в.; 2) конец XVIII в. – начало XX в., и фазой относительного потепления между ними в XVIII в. В холодные периоды в составе лесной растительности южного Приморья возрастала доля ольхи, а в относительно теплые эпизоды – дуба и других широколиственных. В первой половине XVI в. на территории южного Приморья повышалось увлажнение за счет роста атмосферных осадков. Во время максимальной фазы похолодания увлажнение снижалось.

В XX в. температурный тренд устремился на повышение и сопровождался потеплением атмосферы и океана, уменьшением массы снега и льда, повышением уровня моря и увеличением концентраций парниковых газов. В составе долинных сообществ юга Приморья значительно сократилось количество ольхи и берез.

Корреляция палеоклиматических ритмов в южном Приморье во время малого ледникового периода, выделенных на основе пыльцевых данных, с дендрохронологическими дан-

ными по южному Сихотэ-Алиню и Северному полушарию, а также с историческими свидетельствами соседнего Китая показала синхронность наступления климатических событий в регионах, что отражает их глобальную природу и масштаб.

Результаты нашего исследования важны для изучения климатических процессов, происходивших в изучаемом регионе и во всей северо-восточной Азии в последние столетия, и их роли в масштабных глобальных климатических изменениях.

Список литературы

- Борисенков Е.П., Пасецкий В.М. **1983.** Экстремальные природные явления в русских летописях XI–XVII вв. Л.: Гидрометеиздат, 240 с.
- Леви К.Г., Задонина Н.В., Язев С.А., Воронин В.И., Наурзбаев М.М., Хантемиров Р.М. **2012.** Гелиогеодинамика: Природные аспекты глобальных солнечных минимумов: в 3 т. Т. 1. Иркутск: Изд-во ИГУ, 511 с.
- Леви К.Г., Воронин В.И., Задонина Н.В., Язев С.А. **2014.** Малый ледниковый период. Ч. 2. Гелиофизические и природно-климатические аспекты. *Изв. Иркутского государственного университета. Серия: Геоархеология. Этнология. Антропология*, 9: 2–33.
- Полозова Л.Г. **1988.** Климатические условия Малого ледникового периода, восстановленные по дендрохронологии. В кн.: *Колебания климата за последнее тысячелетие*. Л.: Гидрометеиздат, 168–176.
- Eddy J.A. **1976.** The Maunder Minimum. *Science*, 192(4245): 1189–1202. <https://doi.org/10.1126/science.192.4245.1189>
- Eddy J.A. **1977.** The Case of the Missing Sunspots. *Scientific American*, 236(5): 80–88. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0577-80>
- Crowley T.J., Zielinski G., Vinther B., Udisti R., Kreuz K., Cole-Dai J., Castellano E. **2008.** Volcanism and the Little Ice Age. *PAGES News*, 16(2): 22–23. <https://doi.org/10.22498/pages.16.2.22>
- Wilson R., Anchukaitis K., Briffa K.R., Büntgen U., Cook E., D'Arrigo R., Davi N., Esper J., Frank J., Gunnarson B. et al. **2016.** Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings. Pt I: The long term context. *Quaternary Science Reviews*, 134: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.12.005>
- Кренке А.Н., Чернавская М.М. **1991.** Исследования климата исторического прошлого Китая. *Известия АН СССР. Серия географическая*, 5: 108–116.
- Ukhvatkina O.N., Omelko A.M., Zhmerenetsky A.A., Petrenko T.Y. **2018.** Autumn–winter minimum temperature changes in the southern Sikhote-Alin mountain range of northeastern Asia since 1529 AD. *Climate of the Past*, 14: 57–71. <https://doi.org/10.5194/cp-14-57-2018>
- Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Копотева Т.А., Климин М.А., Ляшевская М.С., Паничев А.М., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Петров А.Ю. **2021.** Развитие Солонцовских озер как показатель динамики увлажнения в Центральном Сихотэ-Алине в позднем голоцене. *Геосистемы переходных зон*, 5(3): 287–304. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.287-304>
- Микишин Ю.А., Петренко Т.И., Гвоздева И.Г., Попов А.Н., Кузьмин Я.В., Раков В.А., Горбаренко С.А. **2008.** Голоцен побережья юго-западного Приморья. *Научное обозрение*, 1: 8–27.
- Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. **2014.** Палеосреда о. Русский (южное Приморье) в среднем-позднем голоцене. *Фундаментальные исследования*, 3: 516–522. <https://doi.org/10.17513/fr.33706>
- Yan J., Ge Q., Liu H., Zheng J., Fu H. **2014.** Reconstruction of sub-decadal winter half-year temperature during 1651–2010 for the North China Plain using records of frost date. *Atmospheric and Climate Sciences*, 4(2): 211–218. <https://doi.org/10.4236/acs.2014.42024>
- Иванов Г.И. **1966.** *Классификация почв равнин Приморья и Приамурья*. Владивосток: Дальневост. кн. изд-во, 47 с.
- Ластовецкий Е.И. (ред.) **1976.** *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны Японского моря*. Владивосток, 794 с. (Гр. ДВНИИГМИ; вып. 27).
- Ластовецкий Е.И., Якунин Л.П. **1981.** Гидрометеорологическая характеристика Дальневосточного государственного морского заповедника. В кн.: *Цветковые растения островов Дальневосточного морского заповедника*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, с. 18–33.
- Кожевников А.Е., Кожевникова З.В., Коркишко Р.И. **2000.** Голубиный Утес как рефугиум западнопацифических теплоумеренных реликтовых элементов флоры на юге российского Дальнего Востока. В кн.: *Растения муссонного климата*. Владивосток: Дальнаука, с. 91–92.
- Кожевников А.Е., Коркишко Р.И., Кожевникова З.В. **2005.** Состояние и проблемы охраны флоры юго-западной части Приморского края. *Комаровские чтения*, 51: 101–123.
- Покровская И.М. (ред.) **1950.** *Пыльцевой анализ*. М.: Гос. изд-во геол. лит., 571 с.
- PalDat – Palynological Database*. URL: <https://www.paldat.org/>
- Nakamura J., **1980.** *Diagnostic Characters of Pollen Grains of Japan*. Osaka: Osaka Museum of Natural History, 91 p.
- 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, 208 с.
- Мячина, А.И., Казачихина Л.Л., Мамонтова, И.Б., Калинина В.С. **1971.** *Атлас спор и пыльцы некоторых современных растений Дальнего Востока*. Хабаровск: ДВНЦ АН СССР, 85 с.
- Grimm E. **2004.** *Tilia software 2.0.2*. Springfield: Illinois State Museum Research and Collection Center.
- Арсланов Х.А. **1987.** *Радиоуглерод. Геохимия и геохронология*. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 300 с.
- Озеленение городов Приморского края. 1987.* Авт.: Васильюк В.К., Врищ Д.Л., Журавков А.Ф. и др. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 515 с.
- Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г., Петренко Т.И. **2002.** Спорно-пыльцевые спектры современных отложений побережья юго-западного Приморья. В кн.: *Методические аспекты палинологии: Материалы X Всерос. палинологической конф.* Москва: ИГиРГИ, с. 154–156.
- Jackson R., Arneborg J., Dugmore A., Madsen S., McGovern, Smiarowski K., Streeter R. **2018.** Disequilibrium, adaptation, and the Norse Settlement of Greenland. *Human Ecology*, 46: 665–684. <https://doi.org/10.1007/s10745-018-0020-0>
- Груза Г.В., Ранькова Э.Я. **2003.** Колебания и изменения климата на территории России. *Известия, Физика атмосферы и океана*, 39(2): 166–185.

31. Ранькова Э.Я. **2005.** *Климатическая изменчивость и изменения климата за период инструментальных наблюдений: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук.* Москва, Ин-т глобального климата и экологии Росгидромета и РАН.
 32. Борисова Е.А. **2013.** Эволюция взглядов на изменение климата в Центральной Азии. *История и современность*, 1: 110–124.
 33. Андреев А.Г. **2010.** Межгодовая изменчивость расхода вод через Корейский (Цусимский) пролив и ее влияние на содержание растворенного кислорода в водах Японского моря. *Метеорология и гидрология*, 9: 74–85.
 34. Лобанов В.Б., Данченков М.А., Лучин Е.В., Мезенцева Л.И., Пономарев В.И., Соколов О.В., Трусенкова О.О., Устинова Е.И., Ушакова Р.Н., Хен Г.В. **2014.** Раздел 5.4. Дальневосточные моря России. В кн.: *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. М.: Росгидромет, с. 684–743.
- ## References
1. Borisenkov E.P., Pasetkiy V.M. **1983.** *Ekstremalnye prirodnye yavleniya v russkikh letopisyah XI-XVII vekov [Extreme natural phenomena in Russian chronicles of the 11th–17th centuries]*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 240 p. (In Russ.).
 2. Levi K.G., Zadonina N.V., Yazev S.A., Voronin V.I., Naurzbaev M.M., Khantemirov R.M. **2012.** [*Heliogeodynamics: Natural Aspects of Global Solar Minima*]: in 3 vol. Vol. 1. Irkutsk: Publ. House of Irkutsk State Univ., 511 p. (In Russ.).
 3. Levi K.G., Voronin V.I., Zadonina N.V., Yazev S.A. **2014.** [Little Glacial Age. Pt 2. Heliophysical and climatic aspects]. *Izv. Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geoarkeologiya. Etnologiya. Antropologiya = Bulletin of the Irkutsk State University. Geoarchaeology, Ethnology, and Anthropology Series*, 9: 2–33. (In Russ.).
 4. Polozova L.G. **1988.** [Climatic conditions of the Little Ice Age, reconstructed from dendrochronology]. In: *Kolebaniya klimata za poslednee tysyacheletie [Climate fluctuations over the last millennium]*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 168–176. (In Russ.).
 5. Eddy J.A. **1976.** The Maunder Minimum. *Science*, 192(4245): 1189–1202. <https://doi.org/10.1126/science.192.4245.1189>
 6. Eddy J.A. **1977.** The Case of the Missing Sunspots. *Scientific American*, 236(5): 80–88. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0577-80>
 7. Crowley T.J., Zielinski G., Vinther B., Udisti R., Kreuz K., Cole-Dai J., Castellano E. **2008.** Volcanism and the Little Ice Age. *PAGES News*, 16(2): 22–23. <https://doi.org/10.22498/pages.16.2.22>
 8. Wilson R., Anchukaitis K., Briffa K.R., Büntgen U., Cook E., D'Arrigo R., Davi N., Esper J., Frank J., Gunnarson B. et al. **2016.** Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings. Pt I: The long term context. *Quaternary Science Reviews*, 134: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.12.005>
 9. Krenke A.N., Chernavskaya M.M. **1991.** The study of the climate of historical past in China. *Izv. AN SSR, Seriya Geograficheskaya*, 5: 108–116. (In Russ.).
 10. Ukhvatkina O.N., Omelko A.M., Zhmerenetsky A.A., Petrenko T.Y. **2018.** Autumn–winter minimum temperature changes in the southern Sikhote-Alin mountain range of northeastern Asia since 1529 AD. *Climate of the Past*, 14: 57–71. <https://doi.org/10.5194/cp-14-57-2018>
 11. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Kopteva T.A., Klimin M.A., Lyashchevskaya M.S., Panichev A.M., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu. **2021.** Development of Solontsovskie Lakes as indicator of humidity within Central Sikhote-Alin in the Late Holocene. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 5(3): 287–304. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/grtz.2021.5.3.287-304>
 12. Mikishin Yu.A., Petrenko T.I., Gvozdeva I.G., Popov A.N., Kuzmin Ya.V., Rakov V.A., Gorbarenko S.A. **2008.** Holocene of the coast of southwestern Primorye. *Scientific Review*, 1: 8–27. (In Russ.).
 13. Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G. **2014.** Mid to Late Holocene of Russkyi Island (Southern Primorye). *Fundamental research*, 3: 516–522. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/fr.33706>
 14. Yan J., Ge Q., Liu H., Zheng J., Fu H. **2014.** Reconstruction of sub-decadal winter half-year temperature during 1651–2010 for the North China Plain using records of frost date. *Atmospheric and Climate Sciences*, 4(2): 211–218. <https://doi.org/10.4236/acs.2014.42024>
 15. Ivanov G.I. **1966.** *Klassifikatsiya pochv ravnin Primor'ya i Priamur'ya [Classification of soils of the plains of Primorye and Amur region]*. Vladivostok: Dal'nevostochnoe knizhnoe izdatel'stvo, 47 p. (In Russ.).
 16. Lastovetskiy E.I. (ed.) **1976.** *Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoy zony Yaponskogo morya [Hydrometeorological conditions of the shelf zone of the Sea of Japan]*. Vladivostok, 794 p. (Trudy DVNIIGMI; Iss. 27). (In Russ.).
 17. Lastovetskiy E.I., Yakunin L.P. **1981.** [Hydrometeorological characteristics of the Far East State Marine Reserve]. In: *Tsvetkovye rasteniya ostrovov Dal'nevostochnogo morskogo zapovednika [Flowering plants of the islands of the Far Eastern Marine Reserve]*. Vladivostok: DVNTs AN SSSR, p. 18–33. (In Russ.).
 18. Kozhevnikov A.E., Kozhevnikova Z.V., Korkishko R.I. **2000.** [Golubiny Utes as a refugium of West-Pacific warm-temperate relict flora elements in the south of the Russian Far East]. In: *Rasteniya mussonnogo klimata [Monsoon climate plants]*. Vladivostok: Dal'nauka, p. 91–92. (In Russ.).
 19. Kozhevnikov A.E., Korkishko R.I., Kozhevnikova Z.V. **2005.** Status and problems of flora protection in the southwestern part of Primorsky Krai. *V.L. Komarovskie chteniya*, 51: 101–123. (In Russ.).
 20. Pokrovskaya I.M. (ed.) **1950.** *Pyl'tsevyy analiz [Pollen analysis]*. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo geologicheskoy literatury, 571 p. (In Russ.).
 21. *PalDat – Palynological Database*. URL: <https://www.paldat.org/>
 22. Nakamura J., **1980.** *Diagnostic Characters of Pollen Grains of Japan*. Osaka: Osaka Museum of Natural History, 91 p.
 23. Bobrov A.E., Kupriyanova L.A., Litvintseva M.V., Tarasovich V.F. **1983.** *Spory paprotnikoobraznykh i pyl'tsa golosemennykh i odnodol'nykh rasteniy flory evropeyskoy chasti SSSR [Spores of ferns and pollen of gymnosperms and monocots of the flora of the European part of the USSR]*. Leningrad: Nauka, 208 p. (In Russ.).
 24. Myachina A.I., Kazachikhina L.L., Mamontova I.B., Kalinina V.S. **1971.** *Atlas spor i pyl'tsy nekotorykh sovremennykh rasteniy Dal'nego Vostoka. [Atlas of spores and pollen of some modern plants of the Far East]*. Khabarovsk: DVNTs AN SSSR, 85 p.
 25. Grimm E. **2004.** *Tilia software 2.0.2*. Springfield: Illinois State Museum Research and Collection Center.
 26. Arslanov Kh.A. **1987.** [*Radiocarbon. Geochemistry and geochronology*]. Leningrad: Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, 300 p. (In Russ.).

27. *Ozelenenie gorodov Primorskogo kraja [Urban greening of Primorsky Krai]*. 1987. Authors: Vasilyuk V.K., Vrishch D.L., Zhuravkov A.F. et al. Vladivostok: DVNTs AN SSSR, 515 p. (In Russ.).
28. Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G., Petrenko T.I. 2002. [Spore-pollen spectra of modern deposits of the coast of the southwestern Primorye]. In: *Methodical aspects of palynology: Materialy X Vseros. palinologicheskoy konf.* Moscow: IGI RGI, p. 154–156. (In Russ.).
29. Jackson R., Arneborg J., Dugmore A., Madsen C., McGovern, Smiarowski K., Streeter R. 2018. Disequilibrium, adaptation, and the Norse Settlement of Greenland. *Human Ecology*, 46: 665–684. <https://doi.org/10.1007/s10745-018-0020-0>
30. Gruza G.V., Ran'kova E.Ya. 2003. Climate oscillations and changes over Russia. *Izv. Atmospheric and Oceanic Physics*, 39(2): 145–162.
31. Ran'kova E.Ya. 2005. *Klimaticheskaya izmenchivost' i izmeneniya klimata za period instrumental'nykh nablyudenyi [Climate variability and climate change over the period of instrumental observations]*: extended abstr. of diss. ... doctor of Phys. and Math. Moscow, IGKE = IGCE. (In Russ.).
32. Borisova E.A. 2013. Evolution of views on climate change in Central Asia. *Istoriya i sovremennost'*, 1: 110–124. (In Russ.).
33. Andreev A.G. 2010. Interannual variability of water discharge through the Korea (Tsushima) Strait and its influence on the dissolved oxygen content in the Sea of Japan. *Russian Meteorology and Hydrology*, 35(9): 633–640.
34. Lobanov V.B., Danchenkov M.A., Luchin E.V., Mezentseva L.I., Ponomarev V.I., Sokolov O.V., Trusenkova O.O., Ustinova E.I., Ushakova R.N., Khen G.V. 2014. [Section 5.4. Far Eastern seas of Russia]. In: *Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]*. Moscow: Rosgidromet, 684–743. (In Russ.).

Об авторах

Сотрудники лаборатории палеогеографии и геоморфологии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток:

Ляшевская Марина Сергеевна (<https://orcid.org/0000-0002-5624-3015>), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, lyshevskay@mail.ru

Ганзей Лариса Анатольевна (<https://orcid.org/0000-0002-2538-6603>), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, lganzev@mail.ru

Поступила 2.06.2022
После доработки 19.08.2022
Принята к печати 23.08.2022

About the Authors

Employees of the Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok:

Lyashchevskaya, Marina S. (<https://orcid.org/0000-0002-5624-3015>), Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, lyshevskay@mail.ru

Ganzev, Larisa A. (<https://orcid.org/0000-0002-2538-6603>), Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, lganzev@mail.ru

Received 2 June 2022
Revised 19 August 2022
Accepted 23 August 2022

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



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

УДК 551.89:551.794(571.642)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.218-236>
<https://www.elibrary.ru/bxuwrx>

Палеоклиматы, растительность и геохронология ландшафтно-климатических изменений на побережье юго-западной окраины Сахалина в среднем–позднем голоцене

Ю. А. Микишин^{*1}, А. О. Горбунов², И. Г. Гвоздева¹, М. В. Черепанова³

*E-mail: yurimikishin@fegi.ru

¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

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

³ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Реферат. Комплексное изучение озерно-болотных отложений на морском побережье позволило уточнить ландшафтно-климатические изменения юго-западного Сахалина с конца атлантического периода голоцена до современности. Завершение периода (5400–5300 календарных л.н.) отражено в осадках небольшого пресного озера в приустьевой зоне реки, возникшего в трансгрессивную фазу Японского моря, уровень которого превышал современный на 2–2.5 м. Климат был значительно теплее настоящего и лишь немного уступал условиям оптимума голоцена. Растительный покров составляли широколиственные леса с преобладанием дуба и смешанные ассоциации. Суббореальный период зафиксирован двумя событиями с климатом теплее современного. Первое из них отвечало раннему термическому максимуму периода (4100–3600 к.л.н.), по теплообеспеченности приближавшемуся к финалу атлантика. Его относительная засушливость обусловила незначительное участие темнохвойных пород (ель, пихта) в растительности, в которой главенствовали широколиственные леса с доминированием дуба. Второе событие (3500–2900? к.л.н.) соответствовало позднему термическому максимуму периода, с более прохладным и влажным климатом. Он привел к появлению массивов темнохвойной тайги и ослаблению роли широколиственных лесов. В середине субатлантического периода голоцена (1700–1450 к.л.н.) развивался климат, определивший преобладание ландшафта тайги современного облика, без участия *Tsuga diversifolia*. Впервые обнаружен эпизод с климатом теплее нынешнего, отвечавшим, скорее всего, относительному похолоданию IX – начала X в. в период «Малого оптимума голоцена». Широколиственные деревья в лесах тогда встречались чаще, чем при потеплениях второй половины XIV–XV вв. и современности. Антропогенные изменения XX в. привели к распространению на юго-западном Сахалине открытых ландшафтов с зарослями бамбука и преобладанию берез в растительном покрове.

Ключевые слова: ландшафтно-климатические изменения, радиоуглеродное датирование, спорово-пыльцевой комплекс, диатомовые водоросли, морское побережье, озерные отложения, торфяник

Palaeoclimates, vegetation and geochronology of landscape-climatic evolution on the coast of the southwestern margin of Sakhalin in the Middle–Late Holocene

Yuri A. Mikishin^{*1}, Alexei O. Gorbunov², Irina G. Gvozdeva¹, Marina V. Cherepanova³

*E-mail: yurimikishin@fegi.ru

¹Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

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

³Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. A comprehensive study of lacustrine-swamp sediments made it possible to clarify the landscape and climatic changes on the sea coast of southwestern Sakhalin from the end of the Atlantic Period of Holocene to the present time. The end of Period (5400–5300 Cal.yrBP) is reflected with the sediments of a small freshwater lake

in the mouth zone of river, which arose during the transgressive phase of the Sea of Japan, the level of which was 2–2.5 m higher than the present day. The climate was much warmer than the present one, and only slightly inferior to Holocene optimum conditions. The vegetation cover consisted of broad-leaved forests with oak predominance and mixed associations. The Subboreal Period was recorded by two events warmer than the present climate. The first of them corresponded to the early thermal maximum of the period (4100–3600 Cal.yrBP), close in terms of heat supply to the final of Atlantic Period. Its relative aridity determined the insignificant participation of dark coniferous species (*Picea*, *Abies*) in the vegetation, which was dominated by broad-leaved forests with oak predominance. The second event (3500–2900? Cal.yrBP) corresponded to the late thermal maximum of the Period, with a cooler and more humid climate. It led to a weakening of the significance of broad-leaved forests in the vegetation cover and the appearance of dark coniferous taiga massifs. In the middle of the Subatlantic Period (1700–1450 Cal.yrBP), a climate developed that determined the predominance of the modern taiga landscape, without the participation of the hemlock (*Tsuga diversifolia*). For the first time, an episode warmer than the current climate was discovered, which most likely corresponded to the relative cooling of the IX – early Xth centuries observed in Japan during the period of the “Medieval Warm Period”. Broad-leaved trees in the forests then met more often than during the warming of the second half of the XIV–XVth centuries and modernity. Anthropogenic changes in the XXth century led to the spread of open landscapes with bamboo thickets in southwestern Sakhalin and the predominance of birch in the vegetation cover.

Keywords: landscape-climatic change, radiocarbon dating, pollen assemblage, diatoms, sea coast, lacustrine sediments, peat bog

Для цитирования: Микишин Ю.А., Горбунов А.О., Гвоздева И.Г., Черепанова М.В. Палеоклиматы, растительность и геохронология ландшафтно-климатических изменений на побережье юго-западной окраины Сахалина в среднем–позднем голоцене. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 3, с. 218–236. <https://doi.org/10.30730/grtz.2022.6.3.218-236>; <https://www.elibrary.ru/bxuwrx>

For citation: Mikishin Yu.A., Gorbunov A.O., Gvozdeva I.G., Cherepanova M.V. Palaeoclimates, vegetation and geochronology of landscape-climatic evolution on the coast of the southwestern margin of Sakhalin in the Middle–Late Holocene. *Geosistemy perednykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 218–236. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/grtz.2022.6.3.218-236>; <https://www.elibrary.ru/bxuwrx>

Благодарности и финансирование

Авторы выражают благодарность А.Ю. Петрову (Институт наук о Земле СПбГУ) за проведение радиоуглеродного датирования отложений. Также мы благодарим рецензентов за конструктивные замечания, позволившие улучшить рукопись.

Acknowledgements and Funding

The authors are grateful to Alexei Yu. Petrov (Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University) for radiocarbon dating of the sediments. We also thank the Reviewers for their constructive comments, which allowed us to improve the manuscript.

Введение

Юго-западная окраина Сахалина, протянувшаяся от перешейка Поясок к мысу Крильон на 230 км, характеризуется наиболее теплым на острове климатом. Благодаря этому широколиственные деревья в ее лесах встречаются чаще, чем в других частях острова. Ландшафтно-климатические изменения, происходившие на этой территории в голоцене, издавна представляли большой интерес для палеогеографии. Черемшанский торфяник (разрез «Черемшанка»), лежащий на ее северной границе (рис. 1), был одним из первых на юге острова, изученных спорово-пыльцевым и диатомовым анализами [1, 2]. Исследование выявило 4 фазы развития растительности в голоцене: березовых и широколиственных лесов с примесью ели и пихты (1), елово-пихтовых, березовых и широколиственных лесов (2), березовых и пихтово-еловых лесов, в которых почти в два раза уменьшилась роль широколиственных

деревьев (3), ольховых, березовых и еловых лесов с участием широколиственных пород (4). Они отвечали значительным, продолжительностью до первых тысяч лет, изменениям природы. Их хронология, ввиду отсутствия определений абсолютного возраста, была сопоставлена со схемой климатических колебаний в голоцене Японии: первая и вторая фазы связывались с оптимумом голоцена, третья и четвертая, соответственно, с более поздним похолоданием и современной эпохой [1, 2].

Повторное палеоботаническое изучение Черемшанского торфяника (разрезы «Пензенский I–III»), с широким применением радиоуглеродного датирования, выявило в голоцене юго-запада острова сложную смену ландшафтно-климатических изменений, с периодичностью не более нескольких сот лет [3, 4]. Наиболее раннее из них относилось к середине бореального периода голоцена, несмотря на удревненную дату около 9100 радиоуглерод-

ных лет назад (далее л.н.), отвечающих 10 300 календарным годам (далее к.л.н.). В климатических условиях заметно теплее и относительно суше современных развивались березово-ореховые леса (*Betula–Juglans*), служащие южным вариантом растительности раннеголоценового термического максимума, установленного в палеоклиматической истории северного Сахалина [5]. Темнохвойная тайга имела меньшее значение по сравнению с современным рас-

пространением. В раннюю и среднюю фазы атлантического периода, в оптимальных климатических условиях голоцена, многопородные широколиственные леса получили максимальное развитие на юго-западе острова. Вначале распространялись орехово-дубовые, затем преимущественно дубовые леса, в которых орех встречался чаще ильма. Подчиненную роль играли смешанные сообщества с преобладанием берез и небольшой примесью ели и пихты. Участие темнохвойных деревьев в растительности немного усилилось лишь в первой половине средней фазы периода. Ослабление роли широколиственных деревьев, развитие ольхово-березовых и, вероятно, смешанных лесов с малым участием темнохвойных пород отразило наступление более холодных и сухих климатических условий второй половины среднего атлантика. Исследования последних лет [6] установили их принадлежность к началу позднего атлантика: 6000–5900 л.н. / 6900–6700 к.л.н. Поздняя фаза атлантического периода отличалась частой сменой короткопериодических ландшафтно-климатических изменений. Около 5600 л.н. / 6500–6300 к.л.н., в условиях похолодания и усиления влажности климата, распространились елово-пихтовые леса с примесью широколиственных пород.

Интенсивное потепление около 5600–5300 л.н. / 6400–6100 к.л.н. привело к первенству широколиственных лесов с преобладанием дуба и ослаблению роли темнохвойных деревьев. Кратковременное похолодание и увлажнение климата (вероятно, около 5300 л.н. / 6100 к.л.н.), сопоставимое с современными климатическими условиями, вновь отозвалось распространением темнохвойных лесов с примесью широколиственных пород. Интенсивное потепление климата в конце атлантического периода, около 5300–4700 л.н. / 6100–5500 к.л.н., привело к восстановлению широколиственных лесов с преобладанием дуба и ослаблению роли хвойной растительности.

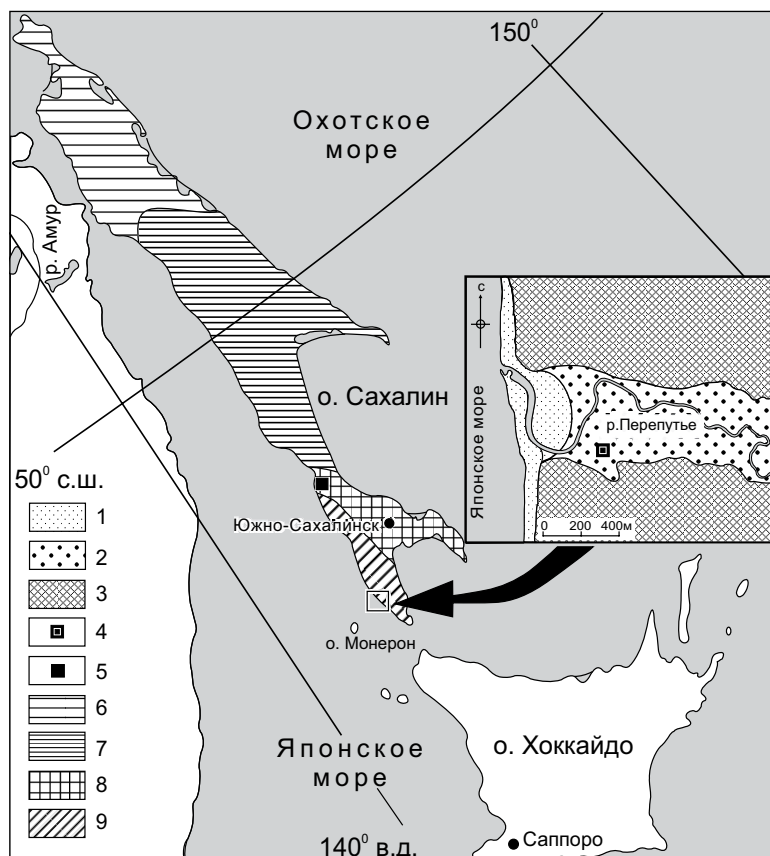


Рис. 1. Расположение изученных разрезов голоцена юго-западной части о. Сахалин.

Рельеф: 1 – пляж и низкая морская аккумулятивная терраса, 2 – речная аккумулятивная терраса, 3 – холмистое подножье прибрежного низкогорья; 4 – разрез «Перепутье», изученный авторами данной статьи; 5 – разрезы, изученные ранее другими авторами: «Черемшанка» [1, 2], «Пензенский I–III» [3, 4]. Геоботаническое районирование о. Сахалин [18]: 6 – подзона лиственных лесов, 7 – подзона зеленомошных темнохвойных лесов с преобладанием ели, 8 – подзона темнохвойных лесов с преобладанием пихты, 9 – подзона темнохвойных лесов с примесью широколиственных пород.

Fig. 1. Location of the studied sections of the Holocene in the southwestern part of Sakhalin Island.

Relief: 1 – beach and low marine accumulative terrace, 2 – river accumulative terrace, 3 – hilly foothills of coastal low mountains; 4 – the Pereput'e section, studied by the authors of this article; 5 – sections previously studied by other authors: Cheremshanka [1, 2], Penza I–III [3, 4]. Geobotanical zoning of Sakhalin Island [18]: 6 – subzone of larch forests, 7 – subzone of green moss dark coniferous forests with a predominance of spruce, 8 – subzone of dark coniferous forests with a predominance of fir, 9 – subzone of dark coniferous forests with an admixture of broad-leaved species.

Умеренное потепление около 4100–4000 л.н. / 4600–4400 к.л.н., наступившее после раннесуббореального минимума (отмеченного, вероятно в начальной стадии, ослаблением роли широколиственных и ростом участия темнохвойных пород), превышало современный климатический уровень, что видно по усилению роли широколиственных деревьев. Мелколиственные и, вероятно, смешанные леса доминировали над темнохвойной тайгой.

Значительное потепление в первой половине средней фазы суббореального периода (3900 л.н. / 4400–4300 к.л.н.) привело к очередной экспансии широколиственных лесов с преобладанием дуба и редкой встречаемости темнохвойных пород. Похолодание и увлажнение климата во второй половине фазы вызвало максимальное в голоцене распространение темнохвойной тайги.

Климатические условия, лишь немного превышавшие современные по теплообеспеченности и близкие к ним по влажности, установились 3200–3000 л.н. / 3500–3100 к.л.н. Они определили развитие мелколиственных и пихтово-еловых лесов с участием широколиственных пород. Вторая половина поздней фазы суббореального периода 2800–2700 л.н. / 3000–2800 к.л.н.) отличалась значительным потеплением, вызвавшим распространение широколиственных лесов.

Начало субатлантического периода (2450–2300 л.н. / 2500–2300 к.л.н.) по теплообеспеченности приближалось к современным условиям, но превышало их по влажности климата, что видно по большему участию в растительности темнохвойных лесов с примесью широколиственных пород. Во вторую половину ранней фазы периода они сменились широколиственными лесами с преобладанием дуба, фиксирующими очередное улучшение климата, сравнимое с позднесуббореальным.

Похолодание в начале среднего субатлантика (1900–1750 л.н. / 1800–1700 к.л.н.), снизившее климатические показатели до современного уровня, обеспечило доминирование в растительности темнохвойных лесов с примесью широколиственных пород. Кратковременное потепление и относительное иссушение климата около 1500 л.н. / 1450 к.л.н. отмечено распространением широколиственных лесов и малым участием темнохвойных пород, вероятно лишь в составе смешанных

лесов. Похолодание и увлажнение климата около 1400 л.н. / 1500–1400 к.л.н. привело к экспансии темнохвойной тайги с меньшей ролью широколиственных деревьев, чем в современных древостоях.

Значительное потепление во второй половине среднего субатлантика (VIII–X вв.) отозвалось кратковременной вспышкой распространения широколиственных лесов, сильно потеснивших темнохвойную тайгу.

Наращение влажности во время позднесредневекового улучшения климата (700–600 к.л.н.) определило развитие темнохвойных лесов с участием широколиственных пород. Похолодание последней фазы «малого ледникового периода» (600–200 к.л.н.) усилило позиции тайги и сократило присутствие широколиственных деревьев, встречавшихся в 2–3 раза реже, чем в современной растительности.

Дальнейшие палеогеографические исследования на юге острова [6, 7–9], как и результаты изучения короткопериодических ландшафтно-климатических изменений в голоцене [10–13], показывают, что в отложениях Черемшанского торфяника отразились не все события средней части периода. Также, возможно, оказались скрыты и некоторые эпизоды в истории позднего голоцена, обнаруженные сравнительно недавно [14].

С целью уточнения картины ландшафтно-климатических изменений в среднем–позднем голоцене на юго-западной окраине острова было предпринято детальное изучение разреза «Перепутье», лежащего вблизи мыса Крильон (рис. 1). Для достижения этой цели его отложения были опробованы почти в два раза чаще, чем это необходимо при мощности разреза около 2.5 м.

Краткая характеристика района исследований

Рельеф юго-западной окраины о. Сахалин сформирован южными звеньями Западно-Сахалинских гор: среднегорным Южно-Камышовым хребтом, высотой до 1000 м, и низкогорной (200–400 м) Южно-Прибрежной цепью, прилегающей к берегу Японского моря. Холмистое подножие последней, изрезанное узкими долинами малых рек, снижается вблизи морского побережья до 60–120 м. В приустьевой части р. Перепутье, где нами проведено изучение разреза голоценовых отложений, днище до-

лины имеет ширину около 400 м. Большая его часть занята первой надпойменной террасой с ровной заболоченной поверхностью, лежащей на абсолютной высоте около 4 м (рис. 2). Фрагментарно встречается и более высокая аллювиальная терраса, высотой около 8 м. Долина реки отгорожена от моря низкой морской аккумулятивной террасой – пересыпью, шириной которой (вместе с пляжем) достигает 270 м. Поверхность террасы осложнена заросшими дюнами высотой до 7–8 м.

Климатические условия юго-западной окраины Сахалина, как и остальных частей острова, во многом определяются муссонной циркуляцией атмосферы умеренных широт [15, 16]. В период зимней стадии муссона (ноябрь–март) северо-западные ветра приносят с области высокого давления на материке холодный и сухой континентальный воздух. Большая часть теплого периода года (апрель–октябрь) находится под влиянием летнего муссона, с характерными для него ветровыми потоками южных и юго-восточных направлений, доставляющими морские воздушные массы. Они обеспечивают преобладание прохладной и влажной погоды, с частыми дождями и туманами. Муссонная циркуляция в течение всего года нарушается выходом на остров циклонов, в том числе тропических (в конце лета и начале осени), с ливневыми дождями и штормовыми ветрами. Наиболее мягким на острове климатом юго-западная окраина обязана географическому положению в относительно теплом секторе окружающих морей, а также обогревающему действию северной ветви Цусимского течения, заходящей в Татарский пролив [17].



Рис. 2. Приустьевая часть долины р. Перепутье в районе изученного разреза. Вид на речную террасу и правый борт долины.

Fig. 2. Mouth part of the valley of the Pereput'e River in the section area. View of the river terrace and the right side of the valley.

Среднегодовые температуры воздуха достигают максимальных для Сахалина значений 3.9–4.3 °С. Среднемесячные показатели в самом теплом месяце (августе) приближаются к 18 °С, а в наиболее холодном (январе) не опускаются ниже –(9–10) °С. Суммы средних суточных температур воздуха выше 10 °С составляют 1600–1800. За год выпадает примерно 900 мм осадков, две трети из которых приходится на теплый период [15, 16].

Юго-запад острова целиком лежит в пределах подзоны темнохвойных лесов с примесью широколиственных пород [18] или аналогичного ей «Крильонского флористического района» [19]. Для этих лесов характерно преобладание пихты над елью и частое присутствие тиса. Разнообразные широколиственные породы (дуб, ильм, клен, бархат, диморфант, аралия и др.) принимают здесь наибольшее участие в растительности по сравнению с остальными частями острова. Кроме присутствия в темнохвойной тайге и долинных лесах они образуют на широких песчаных террасах морского побережья (район мыса Слепиковского) самостоятельные, небольшие по площади леса из дуба с примесью клена. Внутри этих лесных массивов островными куртинами может расти пихта сахалинская. Следует отметить, что зональная растительность в настоящее время сохранилась лишь на приводораздельных участках Южно-Камышового хребта. После масштабных вырубок, проводившихся японскими оккупантами в первой половине XX в., лесистость территории южнее г. Холмск снизилась до 50–60 %, а севернее – упала до 25 % [20]. На месте темнохвойной формации развились каменноберезовые бамбуковые леса, редколесья и бамбуковые заросли.

Материал и методы исследования

Разрез «Перепутье» заложен в приустьевой части долины одноименной реки (46°17' 28.1" с.ш., 141°53'50.5" в.д.), в 450 м от Японского моря, на поверхности аллювиально-озерной террасы абсолютной высотой около 4 м (рис. 1). Полевое изучение разреза проведено в марте 2017 г. и дополнено в августе 2018 г. Отложения опробованы грунтовым пробоотборником – «геослайсером». Сверху вниз в разрезе вскрыты следующие слои, в см:

0–4 – торф травяной, слабо разложившийся, темно-бурого цвета;
 4–16 – торф травяной, среднеразложившийся, темно-бурого цвета, с прослоем сфагнового торфа на глубине 8–12 см;
 16–69 – торф травяной, сильно разложившийся, от черновато-бурого до черного цвета, песчанистый;
 69–114 – торф травяной, среднеразложившийся, песчанистый, темно-бурого цвета, с прослоями песчанистого суглинка серого и серовато-бурого цвета мощностью 0.5–4 см с растительным детритом;
 114–129 – торф травяной, среднеразложившийся, песчанистый, темно-бурого цвета;
 129–153 – торф низинный тростниковый, среднеразложившийся, глинистый, темно-бурого цвета, с прослоями суглинка серого цвета мощностью 2–5 см, с включением растительного детрита;
 153–264 – глина мягкопластичной консистенции, от серовато-бурого до светло-серого цвета, обогащенная органическим веществом и включением многочисленных маломощных (2–3 мм) прослоев растительного детрита (состоящего в основном из стеблей и листьев тростника и осоки), не выдержанных по простиранию, коричневого, реже черного цвета. В интервале 165–166 см – горизонт мелко-среднезернистого песка мощностью 3–7 мм.

Отложения разреза изучены спорово-пыльцевым, диатомовым и радиоуглеродным анализом. Состав пыльцы и спор исследован в 76 образцах, отобранных с шагом 2–3 см. Из верхних слоев торфа (0–57 см) произведен сплошной отбор образцов. Обработка проб выполнялась по стандартной методике, с кипячением в щелочи и двукратным обогащением в тяжелой калиево-кадмиевой жидкости [21]. В препаратах насчитывалось от 500 до 1150 микрофоссилий, из них от 260 до 560 принадлежали пыльце древесных пород. В общем составе спорово-пыльцевых спектров роль пыльцы деревьев и кустарников, фригидных кустарников (кедровый стланик, ольховник и кустарниковые березы), трав и кустарничков, а также спор оценивалась от всего количества обнаруженных микрофоссилий. Процентное участие таксонов в спектрах подсчитывалось отдельно в группах пыльцы древесных пород, травянистых растений и спор. Реконструкция палеорастительности выполнялась на основе соответствия состава субфоссильных спорово-

пыльцевых комплексов современному растительному покрову Сахалина [22].

Диатомовым анализом изучено 23 образца отложений, в 12 из которых створки диатомовых водорослей не были обнаружены. Обработка проб осуществлялась с использованием пирофосфата, перекиси водорода и двукратного обогащения в тяжелой жидкости [23]. В изученных препаратах подсчитывали от 108 до 379 створок, в зависимости от их концентрации в осадках. Систематика и эколого-географическая характеристика водорослей приведена на основе данных литературных источников [24–30]. Под экологической структурой палеосообществ диатомей понимался состав и соотношение представителей разных экологических групп. Участие таксонов в палеосообществах оценивалось следующим образом: доминанты (содержание >15 %), субдоминанты (10–15 %), массовые (>5 %), часто встречающиеся (3–5 %), обычные (1–2 %), единичные (<1 %). Для построения диатомовой диаграммы и выделения диатомовых зон использовалась программа Tilia [31].

Радиоуглеродный возраст отложений определен в лаборатории «Геоморфологические и палеогеографические исследования полярных регионов и Мирового океана» Института наук о Земле СПбГУ, где было получено девять датировок (табл. 1). Калибровка дат выполнена в программе “OxCal 4.2”, с использованием кривой “IntCal 13” [32].

Стратиграфическое расчленение отложений проведено в соответствии со схемой периодизации голоцена Блитта–Сернандера, модифицированной для Северной Евразии [33].

Результаты исследования

Радиоуглеродный анализ. Накопление озерных отложений нижней части разреза происходило в самом конце атлантического периода голоцена, о чем свидетельствует радиоуглеродная дата 4600 л.н. / 5300 к.л.н. из перекрывающего их торфа (см. таблицу). Две даты из озерной пачки (с глубины 202–205 и 185–186.5 см), имеющие одинаковый, около 3700 л.н. / 4100 к.л.н., возраст, менее надежны. Они омоложены на величину не менее тысячи лет, что подтверждается более древним возрастом вышележащего слоя торфа. Инверсия радиоуглеродных дат в сторону омоложения, полученная при определении возраста по растительному детриту, накопившемуся в озерных условиях, следовательно,

сравнима с таковой (1–2 тыс. лет) для нижних, обводненных горизонтов торфяников [34].

Средняя часть разреза (100–145 см), сложенная торфом с прослоями пойменных отложений, формировалась в середине суббореального периода голоцена, после первого длительного перерыва в осадконакоплении. Он продолжался не менее 800 лет, во время значительного похолодания раннего суббореала [7, 35, 36] и начального потепления средней фазы периода [6], что подтверждается датировкой 3760 л.н. / 4130 к.л.н. из низов слоя (см. таблицу). Дата из кровли этого слоя, около 4000 л.н. / 4400 к.л.н., явно удревнена, скорее всего на 500–600 лет. Удревнение радиоуглеродных дат на величину от нескольких сот до тысячи и более лет ранее уже отмечалось для торфяников юго-западной и северной частей Сахалина [3, 37].

Формирование верхней части разреза (0–100 см) началось после второго значительного перерыва, длительностью свыше 1000 лет, охватившего конец суббореального и начало субатлантического периодов голоцена. Торфонакопление возобновилось лишь в середине субатлантического периода, около 1700–1500 л.н. / 1700–1450 к.л.н. (более древний возраст его начала, примерно на 100 лет превышающий показание даты с глубины 73–75 см, вполне допустим, учитывая время, необходимое для накопления нижележащего слоя в интервале 75–100 см). В дальнейшем оно продолжалось в основном лишь в первой половине поздней фазы периода, 800–500 л.н. / 700–550 к.л.н. (см. таблицу).

Спорово-пыльцевой анализ. На спорово-пыльцевой диаграмме (рис. 3) выделяются следующие спорово-пыльцевые комплексы (СПК).

1. СПК “Per-1” (интервал 145–264 см). Общий состав комплекса указывает на небольшое преимущество лесных ландшафтов над открытыми пространствами, занятыми лугами. Среди древесных пород доминирует пыльца широколиственных деревьев (35–51 %). Ведущую роль в ней играют дуб (21–35 %), ильм (4–12 %) и орех (до 6 %). На остальные таксоны в сумме приходится от 1 до 6 %, причем содержания в 2 % достигают только граб и лещина, 1 % – липа и некоторые представители семейства аралиевых, кроме самой аралии, которая с ясенем, бархатом, калиной и буком (*Fagus*) встречается в количестве менее 1 %. Пыльца мелколиственных деревьев, большей частью представленная березами (12–27 %), занимает второе место. Немного уступают им темнохвойные породы с одинаковой, в среднем, ролью как пихты (3–24 %), так и ели (5–18 %). Присутствие пыльцы других хвойных деревьев незначительно: сосна (*Pinus ssp.* *Diploxylon*) – до 3 %, лиственница – до 0.3 %, криптомерия (*Cryptomeria*) – 0.1 %. Фригидных кустарников – ольховника и кедрового стланика – немного (2–15 %). Пыльца трав представлена осоками, реже разнотравьем, злаками, полынью и розоцветными. В небольшом количестве, почти постоянно, встречается пыльца водных растений. Среди спор господствуют папоротники Polypodiaceae и *Osmunda*, плауны отмечаются реже (9–16 %).

Таблица. Радиоуглеродные датировки отложений разреза «Перепутье»

Table. Radiocarbon dating of the sediments of the Pereput'e section

Разрез, координаты	Лабораторный №	Глубина отбора, см	Материал	Возраст образца	
				радиоуглеродный, л.н.	календарный, к.л.н.
«Перепутье», 46°17'28.1"с.ш., 141°53'50.5"в.д.	ЛУ-9365	202–205	Растительный детрит	3710±180	4080±250
	ЛУ-9364	185–186.5	То же	3700±110	4060±160
	ЛУ-8628	145–153	Торф	4600±80	5290±150
	ЛУ-9367	133–135	– « –	3760±50	4130±90
	ЛУ-8629	100–107	– « –	3980±130	4450±200
	ЛУ-9366	73–75	– « –	1580±100	1490±100
	ЛУ-8630	47–55	– « –	1540±100	1450±100
	ЛУ-8631	23–31	– « –	530±90	550±80
«Перепутье-2», там же	ЛУ-8632	22–32	Торф	760±140	730±120

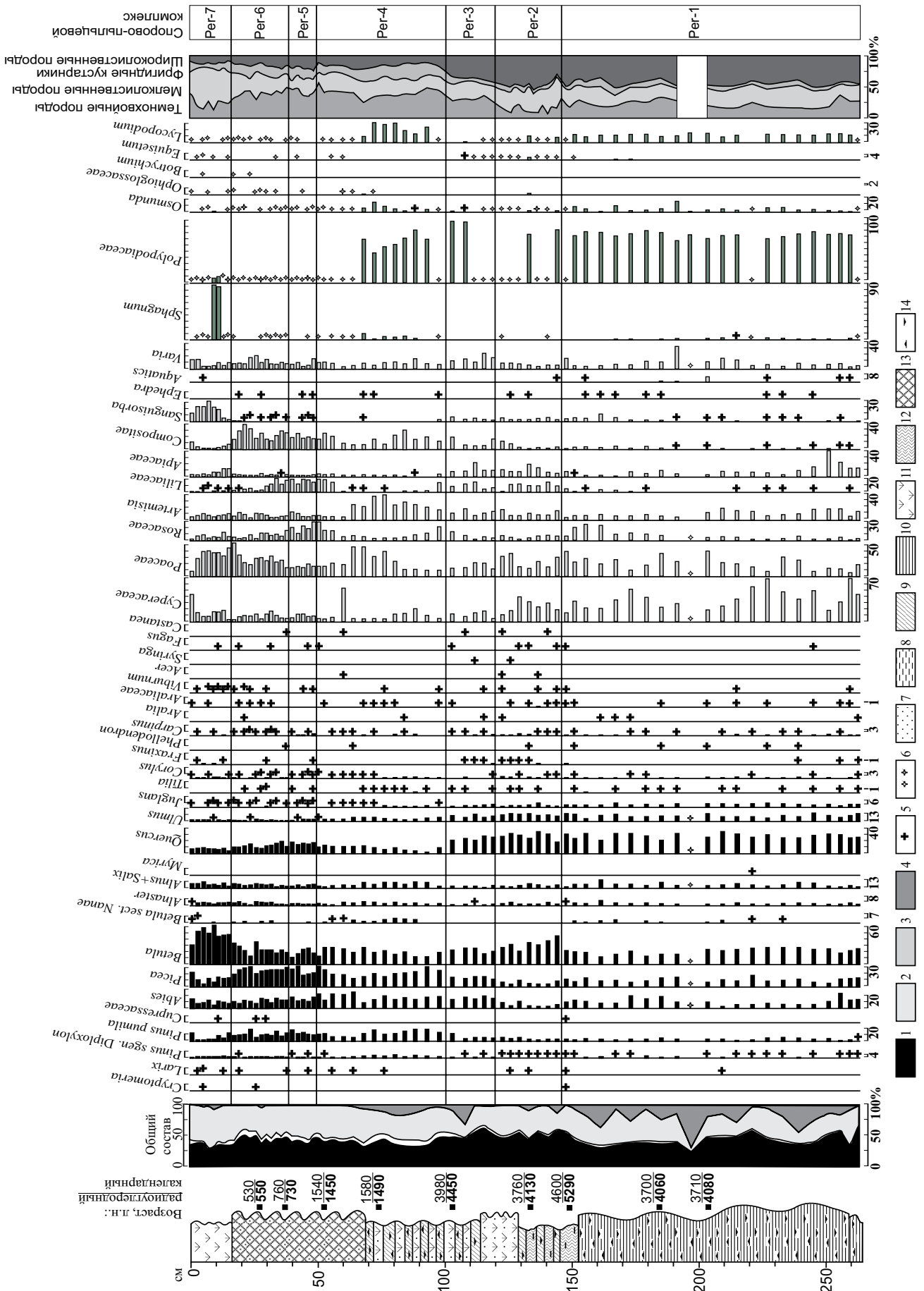
2. СПК “Per-2” определен на глубине 120–145 см. Общий состав пыльцы комплекса отражает равные позиции лесной и луговой растительности. В составе пыльцы древесных пород сохраняется преимущество тех же широколиственных деревьев, что и в предыдущем комплексе: дуб (18–35 %), ильм (7–13 %) и орех (1–6 %). Среди остальных таксонов чаще встречаются лишь граб и лещина (до 3 %), реже – ясень и некоторые аралиевые (до 1 %). Липа, аралия, бархат, калина, клен, сирень, бук и каштан (*Castanea*) присутствуют в количестве менее 1 %. Усиливается роль берез (21–46 %), в меньшей степени – ольхи и ивы. Значение темнохвойных пород снижается в среднем почти в два раза, причем в равной степени как пихты (до 3–11 %), так и ели (до 4–12 %). Содержание фригидных кустарников остается незначительным (4–10 %). Среди пыльцы травянистых растений осоки уступают первое место разнотравью с преобладанием семейств лилейных и зонтичных. Споры по-прежнему образованы папоротниками Polypodiaceae, намного реже – *Osmunda* и *Orhioglossaceae*, а также плаунами (8–11 %). Постоянно фиксируются споры хвощей (до 4 %).

3. СПК “Per-3” (100–120 см) имеет общий состав, указывающий на преобладание в ландшафтах лесопокрытых территорий. Среди древесных пород наблюдается ослабление ведущей роли пыльцы широколиственных пород, с прежним сочетанием как основных (дуб 21–28 %, ильм 6–11 %, орех 1–4 %), так и реже встречающихся (лещина, граб и ясень, до 1–2 %) таксонов. Остальные (липа, аралия, аралиевые, клен, калина, бук и каштан) отмечаются в количестве менее 1 %. На второе место в комплексе выдвигаются темнохвойные породы, роль пыльцы которых возрастает более чем в 2 раза, при сохранении равных долей пихты (12–19 %) и ели (12–16 %). Немного уступают им мелколиственные деревья, почти полностью представленные березами (17–26 %). Слегка подрастает встречаемость фригидных кустарников, в основном кедрового стланика (4–12 %). В группе пыльцы трав на фоне усиления роли разнотравья и полыни происходит снижение присутствия осоковых (почти в 3 раза) и в меньшей степени злаковых. Среди спор господствуют папоротники, почти полностью принадлежащие семейству Polypodiaceae. Хвощи и плауны фиксируются только в нижней половине слоя.

4. Состав СПК “Per-4” (49–100 см) фиксирует выравнивание роли лесной и луговой растительности. Среди пыльцы древесных пород начинают доминировать темнохвойные деревья (24–56 %), с небольшим преимуществом ели над пихтой. Из других хвойных пород заметно чаще (2–5 %) фиксируется сосна (*Pinus sgen. Diploxylon*). Мелколиственные породы сохраняют прежнее второе место. Заметно подрастает доля пыльцы фригидных кустарников, чаще представленная кедровым стлаником (6–19 %), нежели ольховником и кустарниковой березой. Широколиственные породы, по сравнению с предыдущим комплексом, сократили присутствие более чем в 2 раза, переместившись на последнее место (10–22 %). При этом содержание пыльцы ильма сократилось в среднем в 2 (0.3–6 %), дуба – почти в 3 раза (2–13 %). Из остальных широколиственных чаще встречались граб (до 2 %) и липа (до 1 %). Орех, лещина, аралиевые, калина, клен, бук и каштан отмечаются в количестве менее 1 %. Состав пыльцы трав показывает рост содержания полыни, злаковых и розоцветных на фоне ослабления разнотравья. Среди спор снижается участие папоротников, по-прежнему лидирующих в комплексе, и возрастает – плаунов, получивших максимальное развитие (10–32 %). Почти постоянно начинают фиксироваться сфагновые мхи, дотоле отсутствовавшие в спектрах.

5. СПК “Per-5” (39–49 см) имеет незначительный по мощности горизонт. Состав СПК отражает доминирование в ландшафтах луговой растительности. Среди пыльцы древесных пород наблюдается близкое к предыдущему комплексу соотношение основных групп: лидируют темнохвойные (34–46 %) с преимуществом ели над пихтой, уступают им мелколиственные деревья (14–32 %) с преобладанием берез. Роль пыльцы широколиственных пород возросла. Дуб стал отмечаться в среднем почти в 2 раза чаще (14–18 %), а ильм (до 3 %), как и граб (до 2 %), реже. Фригидные кустарники вновь переместились на последнее место в комплексе (12–21 %). Состав пыльцы трав показывает усиление роли разнотравья с преобладанием сложноцветных и лилейных и семейства розоцветных. Участие осоковых, злаковых и особенно полыни снизилось.

6. Общий состав СПК “Per-6” (16–39 см) указывает на небольшое преимущество в ландшафтах лесной растительности над луговой.



Среди пыльцы деревьев и кустарников ослабевает роль темнохвойных пород (29–48 %), чаще представленных елью и, единично, криптомерией. Возрастает роль мелколиственных пород (19–45 %). Участие пыльцы широколиственных деревьев снизилось в среднем до 15 %, выравниваясь с долей фригидных кустарников. При этом встречаемость дуба сократилась примерно в 1.5 раза (8–16 %), как и ильма (0.6–3 %). Из остальных таксонов (лещина, липа, ясень, бархат, граб, аралиевые, калина, бук, каштан) лишь первый имеет содержание в 1 %. Пыльца травянистых растений в основном представлена сложноцветными, в меньшей степени – злаковыми, розоцветными, осоковыми и полынью.

7. СПК “Per-7”, содержащийся в верхнем слое разреза (0–16 см), демонстрирует сокращение роли древесной и максимальное развитие – луговой растительности. Более половины спектра пыльцы деревьев и кустарников (37–68 %) занимают мелколиственные породы с преобладанием берез. Значение пыльцы темнохвойных пород сильно ослабевает (12–37 %). Участие пыльцы фригидных кустарников, как и широколиственных деревьев, снижается в меньшей степени, до 10–11 %. Среди первых чаще отмечается кедровый стланик, среди вторых – дуб (4–9 %). Пыльца травянистых растений показывает почти равное значение разнотравья (с доминированием кровохлебки, характерной травы олуговелых пространств юга острова, возникших на месте вырубленных темнохвойных лесов) и злаков. Споры фиксируют преимущество сфагновых мхов.

Диатомовый анализ. Диатомовая флора представлена 101 видом и внутривидовыми таксонами, относящимися к пресноводной, пресноводно-солонатоводной, озерной, болотной, планктонной, тихоокеанской и бентосной экологическим группам. На основе смены доминирующих таксонов диатомей, соотношения представителей разных экологи-

ческих групп и изменения концентрации их створок, выделены четыре диатомовые зоны (DZ) (рис. 4).

1. В осадках DZ-1 (258–250 см) отмечена самая высокая концентрация створок диатомовых водорослей. Доминирующую группу формируют тихоокеанские виды, проводящие часть жизненного цикла в прикрепленном состоянии, другую – в планктоне: *Staurosira venter* (до 42 %) и *Pseudostaurosira brevistriata* (до 13 %). Озерная тихоокеанская *Ulnaria ulna* (до 8 %) и болотная, возможно, аэрофильная *Pinnularia* aff. *humilis* (до 6 %) диатомеи являются массовыми, а планктонный *Stephanodiscus minutulus* (1 %) – обычным видом.

2. Отложения DZ-2 (250–200 см), как и последующих зон, отличаются снижением концентрации и сохранности створок диатомей. Доминирующую группу в комплексе образуют пресноводные тихоокеанские формы *Staurosira venter* (10–50 %) и *S. construens* (1–31 %), а также бентосная *Navicula peregrina* (20–22 %), с высокими оценками обилия встречающаяся в водоемах береговой зоны морей и эстуариях рек [38–40], способная переносить соленость до 9 ‰ [41]. Болотная *Pseudostaurosira brevistriata* и бентосная озерная *Navicula rhynchocephala* (до 11 % каждая) являются субдоминантами, а *Pinnularia* aff. *humilis* (до 8 %), болотная *P. persudetica* (до 7 %), бентосная пресноводно-солонатоводная *Navicula digitoradiata* (5–7 %) – массовыми видами. Часто встречающиеся диатомеи представлены пресноводными тихоокеанскими *Staurosirella pinnata* (3–4 %), *Ulnaria ulna* (до 3 %), планктонными *Aulacoseira granulata* (до 4 %) и *A. alpigena* (до 3 %), а также бентосной *Cosmioneis pusilla* (3–6 %). Невысокое присутствие пресноводного планктонного *Stephanodiscus hantzschii* (до 2 %), а также солонатоводных обитателей лагун и литорали морей: бентосной *Pinnunavis yarrensii*

Рис. 3. Спорово-пыльцевая диаграмма отложений разреза «Перепутье».

Пыльца и споры: 1 – пыльца деревьев и кустарников, 2 – пыльца фригидных кустарников, 3 – пыльца трав и кустарничков, 4 – споры, 5 – содержание пыльцы и спор менее 1 %, 6 – процент не подсчитан из-за малого числа обнаруженных зерен пыльцы и спор. Литология: 7 – песок, 8 – алеврит, 9 – суглинок, 10 – глина, 11 – торф травяной, среднеразложившийся, 12 – торф низинный тростниковый, среднеразложившийся, 13 – торф травяной, сильно разложившийся, 14 – маломощные прослойки растительного детрита.

Fig. 3. Pollen diagram of the sediments of the Pereput'e section.

1 – pollen of trees and shrubs, 2 – pollen of frigid shrubs (*Pinus pumila*, *Betula* sect. *Nanae*, *Alnaster*), 3 – pollen of grasses and little shrubs, 4 – spores, 5 – content of pollen and spores is less than 1 %, 6 – percentage is not estimated due to the small number of pollen and spore grain. Lithology: 7 – sand, 8 – silt, 9 – loam, 10 – clay, 11 – medium decomposed herbaceous peat, 12 – medium decomposed lowmoor reed peat, 13 – strongly decomposed herbaceous peat, 14 – thin layers of plant detritus.

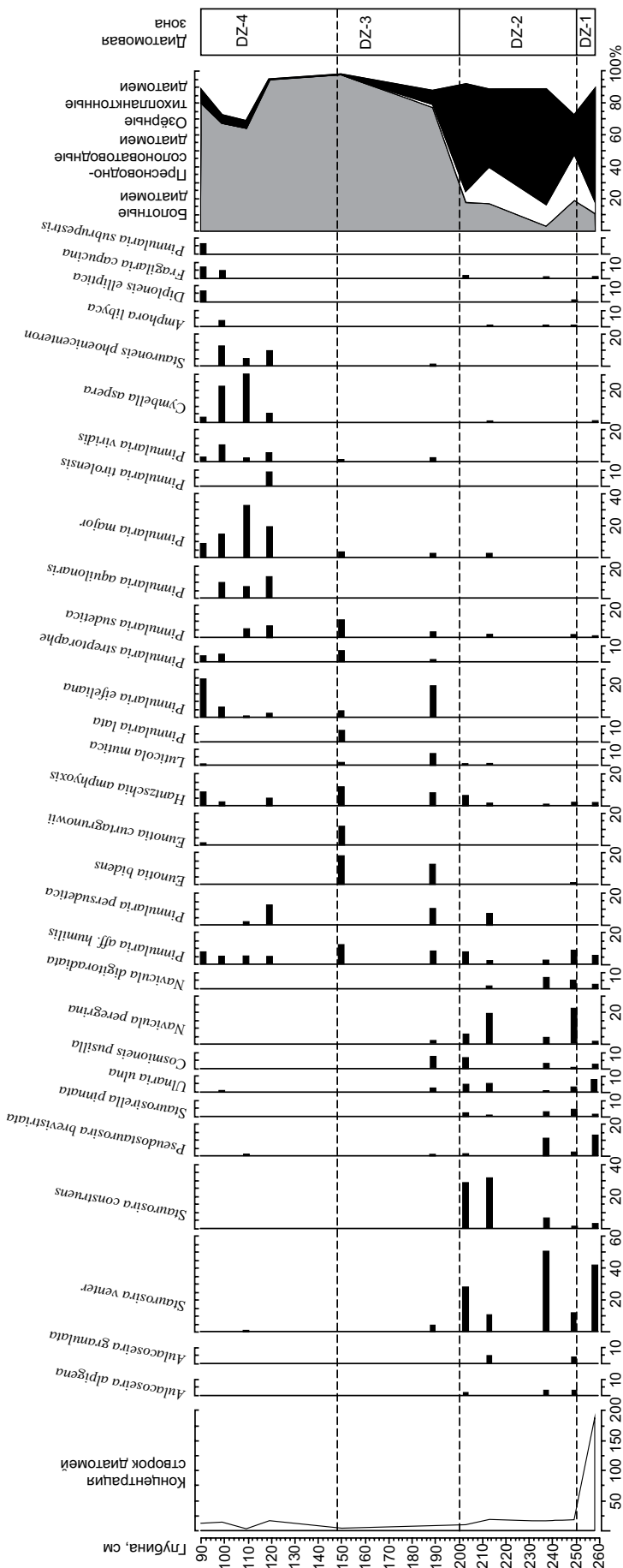


Рис. 4. Диатомовая диаграмма отложений разреза «Перепутье». Fig. 4. Diatom diagram of the sediments of the Perput'e section.

(1–1.5 %) и планктонной *Thalassiosira bramauputrae* (до 2 %) – позволяет отнести их к обычным для данного комплекса.

3. В комплексе DZ-3 (200–150 см) доминируют болотные диатомеи *Pinnularia eifeliana* (до 19 %) и *Eunotia bidens* (до 18 %). Субдоминантами являются также болотные виды *Eunotia curtagrunowii* (до 12 %), *Pinnularia sudetica* (до 11 %) и *P. aff. humilis* (до 13 %), а массовыми – аэрофильные таксоны *Hantzschia amphyoaxis* (до 11 %) и *Luticola mutica* (до 7 %), болотные *Pinnularia persudetica* (до 10 %), *P. lata*, *P. streptoraphe* (до 7 % каждая).

4. В зоне DZ-4 (150–90 см) также преобладают диатомеи болотной экологической группы: *Pinnularia major* (9–32 %), *P. eifeliana* (1–24 %) и *Cymbella aspera* (2–30 %), некоторые из них могут обитать в мелководной зоне озер и даже в почвах: *Pinnularia aquilonaris* (6–13 %), *P. persudetica* (2–12 %), *P. viridis* (3–10 %) и *Stauroneis phoenicenteron* (5–13 %). Массовые таксоны слагаются из диатомей, живущих в болотах и на дне озер: *Pinnularia tirolensis* (до 8 %), *P. aff. humilis* (4–8 %), *P. sudetica* (5–7 %), *P. subrupestris* (до 6 %), *Hantzschia amphyoaxis* (2–8 %), *Diploneis elliptica* (до 7 %), *Eunotia praerupta* (до 7 %), *Fragilaria capucina* (4–7 %).

Обсуждение результатов

Нижняя часть разреза «Перепутье» запечатлела развитие небольшого пресноводного водоема, относящегося к береговым озерам барьерного типа. Такие озера формировались на побережьях морей юга Дальнего Востока в среднем голоцене при блокировании устьевых зон рек прибрежно-морскими наносами во время послеледниковой трансгрессии океана [35, 36,

42, 43]. Возникновение озера в приустьевой зоне р. Перепутье, скорее всего, произошло около 5000 л.н., на позднеатлантическом пике послеледниковой трансгрессии Японского моря, достигавшей на западном побережье Сахалина высоты 3 м [36]. Вторжение морских вод в долину р. Перепутье при этом, судя по ширине низкой морской террасы, приближалось к 300 м. Озерный водоем, сформировавшийся при этом вблизи палеобереговой линии, вряд ли превышал 100–300 м в поперечнике, учитывая ширину долины. На последнем этапе эволюции, запечатленном отложениями разреза, его глубина, скорее всего, составляла первые метры. Регулярные вторжения речных вод поставляли в него алеврито-пелитовые, реже песчаные осадки. Минеральное осадконакопление дополнялось поступлением растительного детрита, как тонкодисперсного, так и более грубого, образующего маломощные прослойки (рис. 5). Судя по мощности глинистых слоев, скорость накопления отложений колебалась от 1–2 до нескольких сантиметров в год. Поэтому метровая пачка глин в озере накопилась быстро, возможно за период не более 100 лет. Озеро было пресным и не имело водообмена с морем, о чем свидетельствует состав обитавших в нем диатомовых водорослей. В то же время заметная доля пресноводно-солончатых таксонов говорит о небольшом осолонении водоема во время формирования нижнего (200–250 см) горизонта осадков. Поступление солей в озеро происходило в результате аэрозольного переноса и, вероятно, волновых заплесков во время сильных штормов. Не исключена также и фильтрация морской воды в озеро через песчаный береговой бар во время ветровых нагонов. Это подтверждает непосредственную близость озера к Японскому морю, уровень которого превышал современный не менее чем на 2–2.5 м, судя по абсолютной высоте кровли озерных отложений. В дальнейшем, при накоплении верхнего горизонта отложений (150–200 см), осолонение водоема прекратилось, что видно по доминированию в нем болотных диатомей. На этой стадии, из-за активного нарастания песчаного барьера, озеро отделилось от моря.

Заполнение озерной котловины речными наносами завершилось около 4600 л.н. / 5300 к.л.н., о чем свидетельствует накопление низинного торфа, начавшееся сразу после осушения водоема. В пользу этого однозначно говорит однотипный состав спорово-пыльцевых

спектров из озерных глин и перекрывающего их торфа, отразивший близкие позиции в растительности многопородных широколиственных и смешанных лесов. Первые из них, с преобладанием дуба, покрывали холмистое подножье, вторые, с небольшим преимуществом берез над темнохвойными породами, располагались на более возвышенных частях прибрежной низкогорной цепи и Южно-Камышового хребта. Лиственная порода бук, как и хвойная криптомерия (*Cryptomeria*), не принимали участия в растительности, несмотря на присутствие их пыльцы, как было установлено при изучении субфоссильных СПК острова [22]. На низкой надпойменной террасе в долине р. Перепутье, как, вероятно, и других рек юго-запада острова, развивались в основном сырые осоково-тростниковые луга. Климатические условия по теплообеспеченности немного уступали, а по влажности – превосходили существовавшие в оптимуме голоцена Сахалина [6], что видно по меньшему участию в растительности широколиственных деревьев и большей роли темнохвойных пород. Нижняя хронологическая граница события вряд ли превышала 4700 л.н. / 5400 к.л.н., учитывая высокую скорость осадконакопления в палеоозере.

Накопление вышележащего слоя (120–153 см) торфяника возобновилось только в середине суббореального периода. Торфообразование, в основном, шло по низинному типу и неоднократно прерывалось отложением тонких горизонтов пойменных суглинков, фиксирующих как высокие речные паводки, так и половодья в долине реки. Теплообеспеченность климата достигала уровня предыдущего события, а влажность была заметно ниже, что определило меньшую (почти в два раза) роль темнохвойных пород в смешанных лесах низкогорья, которая приблизилась к таковой в оптимуме голоцена [3]. На составе широколиственных лесов, покрывавших прибрежные холмы, снижение влажности не сказалось. Ведущие позиции в них, как и раньше, занимал дуб, в меньшей степени ильм и орех (*Juglans*). Намного реже встречались граб и лещина. Видовое разнообразие составляло не менее 13 таксонов, причем бук и каштан (*Castanea*) не принимали участия в растительности. Сырые осоково-тростниковые луга с хвощами, по-прежнему преобладавшие в речных долинах, сократили занимаемые площади; разнотравные луга, напротив, получили большее распространение. Обнаруженное со-

бытие отвечало времени раннего термического максимума суббореального периода, хронологические рамки которого для юга Сахалина определены в 3700–3400 л.н. / 4000–3600 к.л.н. [9]. Не исключено, что оно началось немного раньше, около 3800 л.н. / 4100 к.л.н., учитывая абсолютную дату из низов слоя.



Рис. 5. Озерные глины с малоомощными прослоями растительного детрита (интервал 166–200 см).

Fig. 5. Lacustrine clays with thin layers of plant detritus (interval 166–200 cm).

Формирование болотных отложений в интервале 100–120 см также неоднократно прерывалось накоплением малоомощных прослоев пойменного аллювия. Климатические условия стали немного прохладнее и заметно влажнее предыдущих, по-прежнему оставаясь значительно теплее и суше современных обстановок. Широколиственные леса с преобладанием дуба несколько ослабили занимаемые позиции на холмистом подножье, сохранив прежний состав и участие древесных пород. Также там встречались и смешанные леса, шире распространенные на возвышенных участках низкогогорья, где появились самостоятельные массивы темнохвойной тайги. Разнотравные луга господствовали в долинах рек; меньшую роль играли влаголюбивые осоково-тростниковые луга. Обнаруженное событие развивалось в конце суббореального периода, отвечая позднему термическому максимуму на юге острова, хронологические рамки которого определены в 3250–2800? л.н. / 3500–2900? к.л.н. [9]. Судя по большому участию широколиственных деревьев (сумма пыльцы 34–42 %), климат здесь был теплее, чем в остальных районах острова (23–41 %). Этот факт говорит о действии отепляющего эффекта Цусимского течения и свидетельствует, возможно, в пользу позднесуббореального становления современных климатических различий на юге Сахалина.

Накопление отложений на глубине 49–100 см проходило в более холодных и влажных условиях, близких к показателям современного климата. Они определили развитие южно-таежных темнохвойных лесов с примесью широколиственных деревьев. В долинах рек вновь возросла роль осоково-тростниковых лугов и снизилась – разнотравья. На песчаной морской террасе в устьевой части долины распространилась полынь. Обнаруженное событие тяготеет к средней фазе субатлантического периода голоцена, около 1700–1500 л.н. / 1700–1450 к.л.н. На юго-западе острова оно началось 1900 л.н. / 1800 к.л.н. [4] и закончилось, скорее всего, перед наступлением похолодания VI–VII вв., или «Позднеантичного малого ледникового периода» [44]. В режиме осадконакопления преобладали болотные обстановки, что подтверждается, в том числе, и ведущей ролью диатомей соответствующей им экологической группы. Аллювиальные обстановки фиксировались только до 1600 л.н., что, по-видимому, было связано с достижением поверхностью

надпойменной террасы абсолютной высоты 3.8–4.0 м.

В дальнейшем высота паводков (и половодий) не превышала этот уровень, несмотря на период возрастания активности тайфунов на юге Сахалина [45].

Теплообеспеченность климата в первой половине события в полной мере отвечала современной, во второй – слегка ее превышала, что отражено большим участием широколиственных пород в растительности. Но и в этом случае для него был характерен длительный зимний период с устойчивыми отрицательными температурами воздуха, препятствующий развитию хвойного дерева тсуга (*Tsuga diversifolia*). Поскольку была сделана попытка обосновать присутствие этой породы в темнохвойных лесах юго-западного побережья Сахалина 1700–600 л.н. / 1600–600 к.л.н. [14], нами проанализированы условия формирования отложений, содержащих ее пыльцу, и субфоссильные спектры районов современного произрастания. Пыльца тсуги обнаружена в маломощных горизонтах погребенных почв разреза “Arkansas”, в 8 км к северу от г. Чехов (примерно 47°31'16" с.ш., 141°57'30" в.д.). Разрез находится у подножья холма, подверженного активным склоновым процессам, из-за которых почвообразование не менее 4 раз за последние 1700 лет прерывалось накоплением делювиальных суглинков (не охарактеризованных палинологическим анализом). Учитывая, что холм сложен слабо литифицированными среднемиоценовыми породами чеховской и верхнедуйской свит с палеоботаническими находками тсуги [46], становится ясно, что ее пыльца могла быть переотложена. В пользу переотложения свидетельствует полное несоответствие состава спорово-пыльцевых спектров погребенных почв [14] и образцов современных отложений горных массивов Курикома и Хаккода [47], лежащих вблизи северного предела произрастания тсуги на о. Хонсю. Первые из них, с содержанием пыльцы *Tsuga* 5–40 %, отражают растительность южной тайги (много пыльцы ели и пихты, меньше – кедрового стланика и берез, редкое присутствие широколиственных пород). Вторые, с редкими зёрнами пыльцы *Tsuga*, отвечают развитию хвойно-широколиственного леса теплоумеренного типа (обилие пыльцы разнообразных широколиственных пород с господством бука, участием сосны и криптомерии). Поэтому мнение о попадании пыльцы тсуги в отложения в результате переотложения из дочет-

вертичных пород выглядит намного убедительнее заключений о присутствии этой хвойной породы в голоценовой растительности Сахалина, включая его северо-западную оконечность [48, 49], и лесах о. Хоккайдо с ледникового периода до рубежа в 4000 л.н. [14]. Маловероятным выглядит и расстояние возможной миграции (свыше 700 км) тсуги с о. Хонсю на о. Сахалин за очень короткий отрезок времени, в сочетании с необходимостью форсирования двух морских проливов. Приведенные факты однозначно свидетельствуют против присутствия тсуги в темнохвойных лесах юго-западного Сахалина в середине–конце субатлантического периода.

Маломощный горизонт торфяника в интервале 39–49 см формировался в условиях, превышавших современные по теплообеспеченности и соответствовавших им по влажности климата. Растительность была представлена темнохвойными лесами с примесью широколиственных пород. Рощи и, вероятно, небольшие массивы широколиственных лесов (с преобладанием дуба и, возможно, клена) занимали большие площади, чем в настоящей обстановке. В долинах рек вновь получили развитие разнотравные луга, на песчаных морских террасах – заросли шиповника. Зафиксированное событие происходило в период «Потепления VIII–X вв.», или «Малого оптимума голоцена» [35, 50], отвечая, скорее всего, относительному похолоданию, наблюдавшемуся в Японии в IX или начале X в. [51, 52]. Потепление в оптимальные фазы этого периода достигало уровня поздне-суббореального термического максимума и приводило к распространению широколиственных лесов наряду с ослаблением роли темнохвойной тайги [3].

Приповерхностный интервал торфяника (16–39 см) накапливался в более прохладных условиях по сравнению с предыдущим событием, аналогичным для формирования горизонта 49–100 см. Увлажненность климата почти не изменилась, а термический режим немного превосходил современные показатели, отвечая улучшению климата, установленному на юго-востоке Сахалина для второй половины XIV и XV вв. [35, 53]. В растительности преобладали темнохвойные леса с большей, по сравнению с современной, примесью широколиственных пород. В то же время она была меньше, чем в лесах, развивавшихся во время предыдущего события. Бук и каштан, а также криптомерия среди них, как и раньше, не встречались. В долинах

рек возросло значение осоково-тростниковых и почти не изменилось – разнотравных лугов.

Поверхностный горизонт (0–16 см) торфяника формировался в современных климатических условиях. В растительном покрове березы получили максимальное развитие, возможно, за весь средний–поздний голоцен. Темнохвойные породы в лесах стали встречаться гораздо реже. Лесные территории уступили позиции открытым пространствам с лугами, бамбуковыми зарослями и редколесьями. Резкая смена ландшафтов была вызвана не климатическими, а антропогенными изменениями, связанными со сплошными вырубками лесов в первой половине XX в.

Выводы

Комплексное изучение озерно-болотных отложений на морском побережье юго-западного Сахалина позволило уточнить характер и масштабы ландшафтно-климатических изменений, происходивших в голоцене в течение последних 5400 к.л.н.

1. Значительное, не менее тысячи лет, омоложение радиоуглеродных дат, полученных по растительному детриту, показало его мало пригодным материалом для точного определения возраста озерных отложений. Большинство дат по торфу, напротив, оказалось ближе к их истинному возрасту, что позволило установить время завершения озерной обстановки осадконакопления и хронологию длительных перерывов в формировании болотных отложений верхней половины разреза. Осушение озера произошло в самом конце атлантического периода, около 4600 л.н. / 5300 к.л.н. Первый из длительных перерывов в торфонакоплении охватил ранний суббореал и начало его средней фазы (4600–3800 л.н. / 5300–4100 к.л.н.), второй – конец суббореала и раннюю фазу субатлантического периода (2800?–1700 л.н. / 2900?–1700 к.л.н.).

2. Диатомовый анализ подтвердил озерный генезис отложений нижней пачки разреза, диагностированный по литологическим признакам, и позволил рассмотреть эволюцию небольшого водоема на морском побережье в приустьевой части долины реки. Озеро не имело водообмена с морем, о чем свидетельствует преобладание пресноводных планктонных диатомей. Заметная доля в доминирующей группе диатомей бентосных пресноводно-соленоводных видов показывает непосредственную близость водоема к Японскому морю. Это по-

могло впервые оценить величину (2–2.5 м) повышения его уровня на юго-западном побережье Сахалина для последних моментов атлантического периода голоцена. На заключительной стадии развития легкое осолонение прибрежного озера прекратилось, на что указывает господство болотных диатомей.

3. На основе детального изучения спорово-пыльцевых спектров отложений выявлены следующие ландшафтно-климатические изменения природы юго-западной окраины Сахалина в среднем–позднем голоцене.

1). Значительное потепление климата на завершении поздней фазы атлантического периода, около 4700–4600 л.н. / 5400–5300 к.л.н., определило близкие позиции в растительности многопородных широколиственных лесов с преобладанием дуба и смешанных ассоциаций. Климат события приближался к условиям оптимума голоцена, уступая им по теплообеспеченности и превышая – по увлажненности.

2). Интенсивное потепление среднего суббореала отвечало раннему термическому максимуму этого периода на юге Сахалина (3800–3400 л.н. / 4100–3600 к.л.н.). По теплообеспеченности оно равнялось позднеатлантическому событию, но было засушливее, почти соответствуя минимальной влажности в оптимуме голоцена острова. В растительности преобладали широколиственные и смешанные леса с малым участием темнохвойных пород.

3). Потепление в конце суббореала соответствовало позднему термическому максимуму периода (3250–2800? л.н. / 3500–2900? к.л.н.). Климат был немного прохладнее и существенно влажнее эпохи раннего термического максимума, что обеспечило появление темнохвойной тайги и ослабило позицию широколиственных лесов. В то же время большая роль в растительности широколиственных деревьев по сравнению с остальными районами говорит о более теплом климате, из-за влияния Цусимского течения. Этот факт, скорее всего, свидетельствует о поздне-суббореальном становлении современных климатических различий на юге Сахалина.

4). В середине субатлантического периода, около 1700–1500 л.н. / 1700–1450 к.л.н., установлено развитие южной тайги современного облика, что позволяет считать его продолжением события с климатом, близким к настоящему, наступившим на юго-западе острова 1900 л.н. / 1800 к.л.н. [4].

5). Впервые обнаружены следы кратковременного эпизода с климатом теплее нынешнего и близкого к нему по условиям увлаженности, отвечающего, скорее всего, похолоданию IX – начала X в. внутри потепления «Малого оптимума». Темнохвойные леса, бывшие основным типом растительности, имели большую, чем в современной южной тайге острова, примесь широколиственных пород.

6). Улучшение климата второй половины XIV–XV вв. уступало по теплообеспеченности предыдущему событию, что отразилось в меньшем участии широколиственных пород в лесной растительности.

7). Разительные изменения в ландшафтах юго-западной части острова в XX в., вызвавшие резкое сокращение лесистости и доминирование берез в растительном покрове, обусловлены антропогенным воздействием.

4. Пыльца *Tsuga diversifolia*, встреченная японскими палинологами в палеопочвенных горизонтах юго-западного Сахалина, не свидетельствует о ее присутствии в лесах субатлантического периода голоцена. Субфоссильные спорово-пыльцевые спектры районов современного произрастания тсуги отражают иную растительность, превосходящую по климатическим требованиям не только южную тайгу, но и широколиственные леса, развивавшиеся на юге Сахалина во время послеледникового оптимума. Обоснованным объяснением находок пыльцы тсуги в голоценовых отложениях выглядит только переотложение из дочетвертичных пород.

Список литературы

- Кулаков А.П., Никольская В.В., Федорова Р.В. 1973. О развитии ландшафтов юго-западного Сахалина. *Известия ВГО*, 105(2): 133–141.
- Никольская В.В. 1974. О естественных тенденциях развития физико-географических провинций юга Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, 125 с.
- Гвоздева И.Г., Микишин Ю.А. 2008. Стратиграфия и палеогеография голоцена юго-западного Сахалина. *Естественные и технические науки*, 3: 177–183.
- Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G., Orlova L.A. 2009. Basic Holocene section of South West Sakhalin. In: *Environment Development of East Asia in Pleistocene-Holocene (boundaries, factors, stages of Human mastering): Proceedings of Intern. Scientific Conf., Sept. 14–18, 2009, Vladivostok, Russia*. Vladivostok: Dal'nauka, p. 149–152.
- Хотинский Н.А. 1977. *Голоцен северной Евразии*. М.: Наука, 200 с.
- Микишин Ю.А. 2020. Эволюция ландшафтно-климатических изменений на юге Сахалина в атлантическом периоде голоцена. *Успехи современного естествознания*, 12: 124–131. <https://doi.org/10.17513/use.37548>
- Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. 2017. Ландшафтно-климатические изменения на юге Сахалина в средне-позднеатлантическое время голоцена. *Успехи современного естествознания*, 12: 207–214. <https://doi.org/10.17513/use.36630>
- Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. 2018. Следы похолоданий в позднеледниковье и атлантическом периоде голоцена на юге Сахалина. *Успехи современного естествознания*, 3: 107–116. <https://doi.org/10.17513/use.36711>
- Микишин Ю.А., Пушкарь В.С., Гвоздева И.Г. 2020. Палеогеография побережья южного Сахалина в суббореальном периоде голоцена. *Успехи современного естествознания*, 10: 97–107. <https://doi.org/10.17513/use.37497>
- Alley R.B., Agustsdottir A.M. 2005. The 8k event: cause and consequences of a major Holocene abrupt climatic change. *Quaternary Science Reviews*, 24(10-11): 1123–1149. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.12.004>
- Magny M., Leuzinger U., Bortenschlager S., Haas J.N. 2006. Tripartite climate reversal in Central Europe 5600–5300 years ago. *Quaternary Research*, 65(1): 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2005.06.009>
- Weninger B., Clare L., Gerritsen F., Horejs B., Kraub R., Linstädter J., Özbal R., Rohling E.J. 2014. Neolithisation of the Aegean and Southeast Europe during the 6600–6000 calBC period of Rapid Climate Change. *Documenta Praehistorica*, 41: 1–31. <https://doi.org/10.4312/dp.41.1>
- Борисова О.К. 2014. Ландшафтно-климатические изменения в голоцене. *Известия РАН. Серия географическая*, 2: 5–20. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-2-5-20>
- Igarashi Y., Karya Y., Shimokawa K. 2013. An occurrence of pollen *Tsuga* in late Holocene buried soil in southwest Sakhalin. *The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu)*, 52(3): 59–64. <https://doi.org/10.4116/jaqua.52.59>
- Земцова А.И. 1968. *Климат Сахалина*. Л.: Гидрометеиздат, 197 с.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 34. Сахалинская область*. 1990. Л.: Гидрометеиздат, 352 с.
- Юрасов Г.И., Яричин В.Г. 1991. *Течения Японского моря*. Владивосток: ДВО РАН, 176 с.
- Толмачев А.И. 1955. *Геоботаническое районирование острова Сахалин*. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 78 с.
- Крестов П.В., Баркалов В.Ю., Таран А.А. 2004. Ботанико-географическое районирование острова Сахалин. В кн.: *Растительный и животный мир острова Сахалин (Материалы Междунар. Сахалинского проекта)*. Владивосток: Дальнаука, ч. 2, с. 67–92.
- Растительность. 1967. В кн.: *Атлас Сахалинской области*. М.: ГУГК, с. 105–112.
- Палеопалинология. Т. 1. Методика палеопалинологических исследований и морфология некоторых ископаемых спор, пыльцы и других растительных микрофоссилий*. 1966. Л.: Недра, 352 с. (Тр. ВСЕГЕИ. Новая серия; вып. 141).
- Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. 2009. Субфоссильные спорово-пыльцевые комплексы Сахалина и прилегающих территорий. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 162 с. <https://doi.org/10.17513/np.379>
- Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные)*. 1974. Т. 1. Практическое руководство. Л.: Наука, 403 с.
- Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. 2006. *Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды*. Тель-Авив: Pilies Studio, 498 с.

25. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1986**. *Bacillariophyceae*. Teil 1. *Naviculaceae*. Jena: Gustav Fischer Verlag, 876 p. (In: Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (eds) *Süßwasserflora von Mitteleuropa*; 2).
26. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1988**. *Bacillariophyceae*. Teil 2. *Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*. Jena: Gustav Fischer Verlag, 536 p.
27. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1991**. *Bacillariophyceae*. Teil 3. *Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae*. Jena: Gustav Fischer Verlag, 576 p.
28. Krammer K. **2000**. The genus *Pinnularia*. In: *Diatoms of Europe. Diatoms of the European inland waters and comparable habitats*. Gantner Verlag K.G., 1, 703 p.
29. Krammer K. **2002**. *Cymbella*. In: *Diatoms of Europe. Diatoms of the European inland waters and comparable habitats*. Gantner Verlag K.G., 3, 584 p.
30. Krammer K. **2003**. *Cymboplectra, Delicata, Navicymbula, Gomphocymbellopsis, Afroscymbella*. In: *Diatoms of Europe. Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats*. Gantner Verlag K.G., 4, 530 p.
31. Grimm E.C. **2004**. *TGView 2.0.2 (Software)*. Springfield: Illinois State Museum, Research and Collections Center. URL: <https://www.tiliat.com>
32. Bronk Ramsey C. **2017**. Methods for summarizing radiocarbon datasets. *Radiocarbon*, 59(2): 1809–1833. <https://doi.org/10.1017/rdc.2017.108>
33. Хотинский Н.А. **1987**. Радиоуглеродная хронология и корреляция природных и антропогенных рубежей голоцена. В кн.: *Новые данные по геохронологии четвертичного периода: К XII конгрессу ИНКВА (Канада, 1987 г.)*. М.: Наука, 39–45.
34. Певзнер М.М. **2015**. *Голоценовый вулканизм Среднего хребта Камчатки*. М.: ГЕОС, 246 с.
35. Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. **1996**. *Эволюция природы юго-восточной части острова Сахалин в голоцене*. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 130 с.
36. Короткий А.М., Пушкарь В.С., Гребенникова Т.А., Разжигаяева Н.Г., Караулова Л.П., Мохова Л.М., Ганзей Л.А., Черепанова М.В., Базарова В.Б., Волков В.Г., Ковалюх Н.Н. **1997**. *Морские террасы и четвертичная история шельфа Сахалина*. Владивосток: Дальнаука, 195 с.
37. Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. **2021**. Ранний–средний голоцен северного Сахалина. *Вестник СВНЦ ДВО РАН*, 1: 50–65. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2021-1-50-65>
38. Hartley B., Ross R., Williams D.M. **1986**. A check-list of the freshwater, brackish and marine diatoms of the British Isles and adjoining coastal waters. *J. of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 66(3): 531–610. <https://doi.org/10.1017/s0025315400042235>
39. Hällfors G. **2004**. Checklist of Baltic Sea phytoplankton species (including some heterotrophic protistan groups). *Baltic Sea Environment Proceedings*, 95, 210 p.
40. Kravesky D.M., Meave D.C., Zamudio E., Norris E., Fredericq S., Tunnell J. **2009**. Diatoms (*Bacillariophyta*) of the Gulf of Mexico. In: *Gulf of Mexico origin, waters, and biota*, 1: 155–186.
41. Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. **1994**. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherlands J. of Aquatic Ecology*, 28(1): 117–133. <https://doi.org/10.1007/bf02334251>
42. 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>
43. Разжигаяева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Белянина Н.И., Ганзей К.С., Кайстренко В.М., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Рыбин А.В. **2019**. Проявление климатических изменений и природных катастроф в позднем голоцене на юге о. Уруп (Курильские острова). *Вестник СВНЦ ДВО РАН*, 3: 37–53. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2019-3-37-53>
44. Büntgen U., Myglan V.S., Ljungqvist F.C., McCormick M., Di Cosmo N., Sigl M., Jungclaus J., Wagner S., Krusic P.J., Esper J. et al. **2016**. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nature Geoscience*, 8: 231–237. <https://doi.org/10.1038/ngeo2652>
45. Разжигаяева Н.Г., Гребенникова Т.А., Ганзей Л.А., Горбунов А.О., Пономарев В.И., Климин М.А., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Петров А.Ю. **2020**. Реконструкция палеотайфунов и повторяемости экстремальных паводков на юге острова Сахалин в среднем–позднем голоцене. *Геосистемы переходных зон*, 4(1): 46–70. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.046-070>
46. Ахметьев М.А. **1993**. *Фитоценология континентальных отложений палеогена и миоцена восточной Азии*. М.: Наука, 143 с.
47. Yasuda Y. **1976**. Early historic forest clearance around the ancient castle site of Tagajo, Miyagi prefecture, Japan. *Asian Perspectives*, 19 (1): 42–58.
48. Igarashi Y., Igarashi T. **1998**. Late Holocene vegetation history in south Sakhalin, northeast Asia. *Japanese J. of Ecology*, 48: 231–244.
49. Igarashi Y., Sagayama T., Higake N., Fukuda M. **2000**. Late Quaternary environmental change in Central and North Sakhalin, Russia. *J. of Geography*, 109(2): 165–173. https://doi.org/10.5026/jgeography.109.2_165
50. Разжигаяева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Белянина Н.И., Мохова Л.М. **2014**. Проявления малого оптимума голоцена на юге Дальнего Востока. *География и природные ресурсы*, 2: 124–131.
51. Lamb H.H. **1965**. The early medieval warm epoch and its sequel. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1: 13–37. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(65\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0031-0182(65)90004-0)
52. Sakaguchi Y. **1983**. Warm and cold stages in the past 7600 years in Japan and their global correlation. *Bull. of the Department of Geography of the University of Tokyo*, 15: 1–31.
53. Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. **2016**. Поздний субатлантик южного Сахалина. *Успехи современного естествознания*, (9): 137–142. <https://doi.org/10.17513/use.36134>

References

- Kulakov A.P., Nikol'skaya V.V., Fedorova R.V. **1973**. [On landscape evolution in the southwestern Sakhalin]. *Izvestiya VGO*, 105(2): 133–141. (In Russ.).
- Nicol'skaya V.V. **1974**. *O estestvennykh tendentsiyakh razvitiya fiziko-geograficheskikh provintsii yuga Dal'nego Vostoka* [On the natural trends in development of the physiographic provinces of the south of the Far East]. Novosibirsk: Nauka, 125 p. (In Russ.).
- Gvozdeva I.G., Mikishin Yu.A. **2008**. [Stratigraphy and paleogeography of the Holocene of the southwestern Sakhalin]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 3: 177–183. (In Russ.).
- Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G., Orlova L.A. **2009**. Basic Holocene section of South West Sakhalin. In: *Environment*

- Development of East Asia in Pleistocene-Holocene (boundaries, factors, stages of Human mastering): Proceedings of Intern. Scientific Conf., Sept. 14–18, 2009, Vladivostok, Russia.* Vladivostok: Dalnauka, p. 149–152.
5. Khotinskii N.A. **1977**. *Golotsen severnoi Evrazii [Holocene of Northern Eurasia]*. Moscow: Nauka, 200 p. (In Russ.).
 6. Mikishin Yu.A. **2020**. Evolution of landscape-climatic changes on the South Sakhalin in the Atlantic period of Holocene. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, 12: 124–131. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37548>
 7. Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G. **2017**. Landscape-climatic changes in the South Sakhalin Island in the Middle-Late Atlantic Epoch of the Holocene. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, 12: 207–214. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.36630>
 8. Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G. **2018**. Traces of cooling in the southern Sakhalin in the Late-Glacial and Atlantic period of Holocene. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, 3: 107–116. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.36711>
 9. Mikishin Yu.A., Pushkar' V.S., Gvozdeva I.G. **2020**. Paleogeography of the South Sakhalin marine coast in the Subboreal period of Holocene. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, 10: 97–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37497>
 10. Alley R.B., Agustsdottir A.M. **2005**. The 8k event: cause and consequences of a major Holocene abrupt climatic change. *Quaternary Science Reviews*, 24(10-11): 1123–1149. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.12.004>
 11. Magny M., Leuzinger U., Bortenschlager S., Haas J.N. **2006**. Tripartite climate reversal in Central Europe 5600–5300 years ago. *Quaternary Research*, 65(1): 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2005.06.009>
 12. Weninger B., Clare L., Gerritsen F., Horejs B., Kraub R., Linstädter J., Özbal R., Rohling E.J. **2014**. Neolithisation of the Aegean and Southeast Europe during the 6600–6000 calBC period of Rapid Climate Change. *Documenta Praehistorica*, 41: 1–31. <https://doi.org/10.4312/dp.41.1>
 13. Borisova O.K. **2014**. Landscape and climate change in Holocene. *Izv. RAN. Seriya Geograficheskaya = Bull. of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2: 5–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-2-5-20>
 14. Igarashi Y., Karya Y., Shimokawa K. **2013**. An occurrence of pollen *Tsuga* in late Holocene buried soil in southwest Sakhalin. *The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu)*, 52(3): 59–64. <https://doi.org/10.4116/jaqua.52.59>
 15. Zemtsova A.I. **1968**. [The climate of Sakhalin]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 197 p. (In Russ.).
 16. *Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. Ch. 1–6(34). Sakhalinskaya oblast' [Scientific and applied handbook on the USSR climate. Series 3. Long-term data Pt 1-6(34). Sakhalin Region]*. **1990**. Leningrad: Gidrometeoizdat, 352 p. (In Russ.).
 17. Yurasov G.I., Yarichin V.G. **1991**. *Techeniya Yaponskogo moriya [Currents of the Sea of Japan]*. Vladivostok: DVO RAN, 176 p.
 18. Tolmachev A.I. **1955**. *Geobotanicheskoe raionirovanie ostrova Sakhalin [Geobotanical zoning of Sakhalin Island]*. Moscow; Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 78 p. (In Russ.).
 19. Krestov P.V., Barkalov V.Yu., Taran A.A. **2004**. [Botanical and geographical zoning of Sakhalin]. In: *Rastitel'nyi i zhivotnyi mir ostrova Sakhalin (Materialy Mezhdunar. Sakhalinskogo proekta) [Flora and fauna of Sakhalin Island (Materials of the International Sakhalin project)]*. Vladivostok: Dal'nauka, 2, p. 67–92. (In Russ.).
 20. [Vegetation]. **1967**. In: *Atlas Sakhalinskoi oblasti [Atlas of Sakhalin region]*. Moscow: GUGK, p. 105–112. (In Russ.).
 21. *Paleopalinologiya. T. 1. Metodika paleopalinologicheskikh issledovaniy i morfologiya nekotorykh iskopaemykh spor; pyl'tsy i drugikh rastitel'nykh mikrofosilii [Paleopalynology. Vol. 1. Methodology for paleopalynological studies and morphology of some fossil spores, pollen and other vegetative microfossils]*. **1966**. Leningrad: Nedra, 352 p. (Tr. VSEGEL. Nov. ser.; iss. 141). (In Russ.).
 22. Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G. **2009**. *Subfossil'nye sporovopyl'tsevye komplekсы Sakhalina i prilegayushchikh territorii [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>
 23. *Diatomovye vodorosli SSSR (iskopaemye i sovremennye) [Diatom algae of the USSR (fossil and modern)]*. **1974**. Vol. 1. [Practice guideline]. Leningrad: Nauka, 403 p. (In Russ.).
 24. Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. **2006**. [Biodiversity of the algae serving as environment indicators]. Tel'-Aviv: Pilies Studio, 498 p.
 25. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1986**. *Bacillariophyceae. Teil 1. Naviculaceae*. Jena: Gustav Fischer Verlag, 876 p. (In: Ettl H. et al. (eds) Süßwasserflora von Mitteleuropa; 2).
 26. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1988**. *Bacillariophyceae. Teil 2. Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*. Jena: Gustav Fischer Verlag, 536 p.
 27. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1991**. *Bacillariophyceae. Teil 3. Centrales, Fragilariaceae, Eumotiaceae*. Jena: Gustav Fischer Verlag, 576 p.
 28. Krammer K. **2000**. The genus *Pinnularia*. In: *Diatoms of Europe. Diatoms of the European inland waters and comparable habitats*. Gantner Verlag K.G., 1, 703 p.
 29. Krammer K. **2002**. *Cymbella*. In: *Diatoms of Europe. Diatoms of the European inland waters and comparable habitats*. Gantner Verlag K.G., 3, 584 p.
 30. Krammer K. **2003**. *Cymbopleura, Delicata, Navicymbula, Gomphocymbellopsis, Afrocyymbella*. In: *Diatoms of Europe. Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats*. Gantner Verlag K.G., 4, 530 p.
 31. Grimm E.C. **2004**. *TGView 2.0.2 (Software)*. Springfield: Illinois State Museum, Research and Collections Center. URL: <https://www.tiliiat.com>
 32. Bronk Ramsey C. **2017**. Methods for summarizing radiocarbon datasets. *Radiocarbon*, 59(2): 1809–1833. <https://doi.org/10.1017/rdc.2017.108>
 33. Khotinskii N.A. **1987**. Radiouglerodnaya khronologiya i korrelyatsiya prirodnykh i antropogennykh rubezhei golotsena. In: *Novye dannye po geokhronologii chetvertichnogo perioda [Radiocarbon chronology and correlation of natural and anthropogenic boundaries of the Holocene]*: K XII kongressu INKVA (Kanada, 1987) [To the XII INKVA congress (Canada, 1987)]. Moscow: Nauka, p. 39–45. (In Russ.).
 34. Pevzner M.M. **2015**. *Golotsenoviye vulkanizm Sredinnogo khrebita Kamchatki [Holocene volcanism of the Sredinny Range of Kamchatka]*. Moscow: GEOS, 246 p. (In Russ.).
 35. Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G. **1996**. *Evolutsiya prirody yugo-vostochnoi chasti ostrova Sakhalin v golotsene [Evolution of nature of the southwest part of Sakhalin Island in the Holocene]*. Vladivostok: Izd-vo Dal'nevost. universiteta, 130 p. (In Russ.).
 36. Korotkii A.M., Pushkar' V.S., Grebennikova T.A., Razzhigaeva N.G., Karaulova L.P., Mokhova L.M., Ganzei L.A., Cherepanova M.V., Bazarova V.B., Volkov V.G., Kovalyukh N.N. **1997**. *Morskie terrasy i chetvertichnaya istoriya shel'fa Sakhalina [Marine terraces and the quaternary*

- history of Sakhalin shelf]. Vladivostok: Dal'nauka, 195 p. (In Russ.).
37. Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G. **2021**. Early to Middle Holocene in Northern Sakhalin. *Bull. of the North-East Scientific Center of FEB RAS*, 1: 50–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2021-1-50-65>
 38. Hartley B., Ross R., Williams D.M. **1986**. A check-list of the freshwater, brackish and marine diatoms of the British Isles and adjoining coastal waters. *J. of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 66(3): 531–610. <https://doi.org/10.1017/s0025315400042235>
 39. Hällfors G. **2004**. Checklist of Baltic Sea phytoplankton species (including some heterotrophic protistan groups). *Baltic Sea Environment Proceedings*, 95, 210 p.
 40. Kraysky D.M., Meave D.C., Zamudio E., Norris E., Fredericq S., Tunnell J. **2009**. Diatoms (*Bacillariophyta*) of the Gulf of Mexico. In: *Gulf of Mexico origin, waters, and biota*, 1: 155–186.
 41. Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. **1994**. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherlands J. of Aquatic Ecology*, 28(1): 117–133. <https://doi.org/10.1007/bf02334251>
 42. 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>
 43. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Belyanina N.I., Ganzey K.S., Kaistrenko V.M., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Rybin A.V. **2019**. Manifestation of Late Holocene climatic changes and natural hazards on the south of Urup Island (Kuril archipelago). *Bull. of the North-East Scientific Center of FEB RAS*, 3: 37–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2019-3-37-53>
 44. Büntgen U., Myglan V.S., Ljungqvist F.C., McCormick M., Di Cosmo N., Sigl M., Jungclaus J., Wagner S., Krusic P.J., Esper J. et al. **2016**. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nature Geoscience*, 8: 231–237. <https://doi.org/10.1038/ngeo2652>
 45. Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Gorbunov A.O., Ponomarev V.I., Klimin M.A., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu. **2020**. Reconstruction of paleotyrphoons and recurrence of extreme floods in south Sakhalin Island in Middle–Late Holocene. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(1): 46–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.046-070>
 46. Akhmet'ev M.A. **1993**. *Fitostratigrafiya kontinental'nykh otlozhenii paleogena i miotsena vntropicheskoi Azii [Phytostratigraphy of the continental sediments of the Paleogene and Miocene of extratropical Asia]*. Moscow: Nauka, 143 p. (In Russ.).
 47. Yasuda Y. **1976**. Early historic forest clearance around the ancient castle site of Tagajo, Miyagi prefecture, Japan. *Asian Perspectives*, 19 (1): 42–58.
 48. Igarashi Y., Igarashi T. **1998**. Late Holocene vegetation history in south Sakhalin, northeast Asia. *Japanese J. of Ecology*, 48: 231–244.
 49. Igarashi Y., Sagayama T., Higake N., Fukuda M. **2000**. Late Quaternary environmental change in Central and North Sakhalin, Russia. *J. of Geography*, 109(2): 165–173. https://doi.org/10.5026/jgeography.109.2_165
 50. Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Belyanina N.I., Mokhova L.M. **2014**. The manifestations of the Holocene Little Climatic Optimum in the southern Far East. *Geography and Natural Resources*, 35(2): 173–180. <https://doi.org/10.1134/s1875372814020097>
 51. Lamb H.H. **1965**. The early medieval warm epoch and its sequel. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1: 13–37. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(65\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0031-0182(65)90004-0)
 52. Sakaguchi Y. **1983**. Warm and cold stages in the past 7600 years in Japan and their global correlation. *Bull. of the Department of Geography of the University of Tokyo*, 15: 1–31.
 53. Mikishin Yu.A., Gvozdeva I.G. **2016**. Late Subatlantic in the south of Sakhalin Island. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia = Advances in Current Natural Sciences*, 9: 137–142. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.36134>

Об авторах

Микишин Юрий Анатольевич (<https://orcid.org/0000-0003-1709-8887>), кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории палеоэкологии кайнозоя, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, yurimikishin@fegi.ru

Горбунов Алексей Олегович (<https://orcid.org/0000-0002-5903-6660>), кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, briiz@yandex.ru

Гвоздева Ирина Георгиевна (<https://orcid.org/0000-0001-7322-4441>), научный сотрудник лаборатории палеоэкологии кайнозоя, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, gvozdika@fegi.ru

Черепанова Марина Валерьевна (<https://orcid.org/0000-0002-6530-0093>), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории палеоботаники, ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, cherepanova@biosoil.ru

About the Authors

Mikishin, Yuri A. (<https://orcid.org/0000-0003-1709-8887>), Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher of the Laboratory of paleoecology of Cenozoic, Far East Geological Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, yurimikishin@fegi.ru

Gorbunov, Alexei O. (<https://orcid.org/0000-0002-5903-6660>), Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher of the Laboratory of coastal geosystems, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, briiz@yandex.ru

Gvozdeva, Irina G. (<https://orcid.org/0000-0001-7322-4441>), Researcher of the Laboratory of paleoecology of Cenozoic, Far East Geological Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, gvozdika@fegi.ru

Cherepanova, Marina V. (<https://orcid.org/0000-0002-6530-0093>) Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Laboratory of paleobotany, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, cherepanova@biosoil.ru

Поступила в редакцию 06.06.2022
После рецензирования 11.07.2022
Принята к публикации 03.08.2022

Received 6 June 2022
Revised 11 July 2022
Accepted 3 August 2022

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



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

УДК 556.5+551.4+550.4

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.237-245>
<https://www.elibrary.ru/izrieo>

Первые результаты полевых работ 2021 г. на группе Новиковских Карьерных озер (о. Сахалин): морфология и морфометрические параметры котловин

Ф. А. Романюк*, Д. Н. Козлов, Р. В. Жарков

*E-mail: f.romanyuk2011@gmail.com

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

Реферат. Впервые рассмотрены данные о морфологии озерных котловин трех Новиковских Карьерных озер, образовавшихся после прекращения добычи угля на Новиковском бурогольном месторождении с германиевыми углями (с. Новиково, Корсаковский район Сахалинской области). Приведены батиметрические профили и схемы с изобатами, выполненные с помощью интерполяции данных 29 эхолотных профилей высокой детализации общей протяженностью около 25 км. Рассчитаны морфометрические параметры озер и описан морфологический облик их котловин. Уточнены данные о глубинах и химическом составе оз. Бирюзовое Карьерное – глубочайшего водного объекта на о. Сахалин. Выполнена сравнительная характеристика исследуемых озер.

Ключевые слова: остров Сахалин, Новиковские Карьерные озера, эхолотная съемка, морфология, морфометрические параметры, батиметрическая схема

First results of field work in 2021 on the group of Novikovskiye Karyernye lakes (Sakhalin Island): morphology and morphometric parameters of basins

Fedor A. Romanyuk*, Dmitriy N. Kozlov, Rafael' V. Zharkov

*E-mail: f.romanyuk2011@gmail.com

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

Abstract. Data on the morphology of the lake basins of three Novikovskiye Karyernye lakes, formed after the completion of coal mining at the Novikovo brown coal field with germanium-bearing coals (Novikovo village, Korsakov district of the Sakhalin region) were considered for the first time in the work. Bathymetric profiles and schemes with isobats made using interpolation of data from 29 high resolution echo-sounder profiles with a total length of about 25 km are given in the article. Morphometric indices of the lakes are calculated; the morphological appearance of their basins is described. The data on the depths and chemical composition of Biryuzovoye Karyernoye lake – the deepest waterbody on Sakhalin Island – are updated. The comparative characteristics of the lakes have been carried out.

Keywords: Sakhalin Island, Novikovskiye Karyernye lakes, echo-sounding survey, morphology, morphometric parameters, bathymetric scheme

Для цитирования: Романюк Ф.А., Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Первые результаты полевых работ 2021 г. на группе Новиковских Карьерных озер (о. Сахалин): морфология и морфометрические параметры котловин. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 3, с. 237–245. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.237-245>; <https://www.elibrary.ru/izrieo>

For citation: Romanyuk F.A., Kozlov D.N., Zharkov R.V. First results of field work in 2021 on the group of Novikovskiye Karyernye lakes (Sakhalin Island): morphology and morphometric parameters of basins. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 237–245. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.237-245>; <https://www.elibrary.ru/izrieo>

Финансирование

Работа выполнена в соответствии с планом НИР лаборатории вулканологии и вулканопасности ИМГиГ ДВО РАН «Вулканизм Сахалина и Курильских островов: мониторинг, хронология активности, вещественный состав продуктов, гидротермальные системы» (ГР 121030100168-3; дата регистр. 24.02.2021; рук. А.В. Рыбин).

Funding

The work was carried out in accordance with the research plan of the Laboratory of volcanology and volcanic hazard IMGG FEB RAS “Volcanism of Sakhalin and the Kuril Islands: monitoring, chronology of activity, material composition of products, hydrothermal systems” (Registration number 121030100168-3; Date of registration 24.02.2021; Headed by A.V. Rybin).

Введение

Один из видов природных ресурсов, которым богата Сахалинская область, – уголь. В прошлом столетии его добыча велась открытым и закрытым способом по всему южному и центральному Сахалину, в настоящее время угольные разработки ведутся исключительно открытым способом. Близ с. Новиково (Корсаковский городской округ, Сахалинская область) расположено месторождение, отличающееся повышенным содержанием в углях германия – весьма ценного в производстве оптики и военной промышленности полуметалла [1]. В начале 2000-х годов эксплуатация месторождения была прекращена, в результате чего на месте карьеров образовались водоемы. Существующие ныне 20 водных объектов в пределах месторождения (6 крупных и 14 малых) корректнее называть обводненными карьерами, однако в СМИ и публикациях в наименованиях чаще используют более лаконичный вариант «озеро».

Новиковские Карьерные озера в настоящее время представляют собой не только весь-

ма популярный объект для посещения гостями и жителями острова, но и малоизученные источники пресной воды. В научной литературе имеются сведения о темпах сукцессионных процессов на территории Новиковского месторождения [2]. Однако, не имея должного представления об эрозионных процессах склонов котловин озер, их морфометрических характеристиках, объеме и качестве вод, затруднительно дать оценку этим природно-антропогенным резервуарам, ведь, несмотря на их искусственное происхождение, они, как и природные озера, являются расходно-накопительными системами, в которых накопление вещества играет важную роль в лимнических процессах. Ранее наша исследовательская группа уже проводила обследование наиболее популярного озера Бирюзовое Карьерное [3, 4], которое оказалось самым глубоким водоемом на о. Сахалин – глубина его более 100 м. В сентябре 2021 г. объектами исследования стали Бирюзовое Карьерное и два соседних с ним озера (рис. 1). Часто в СМИ и на туристических сайтах* фигурируют местные названия

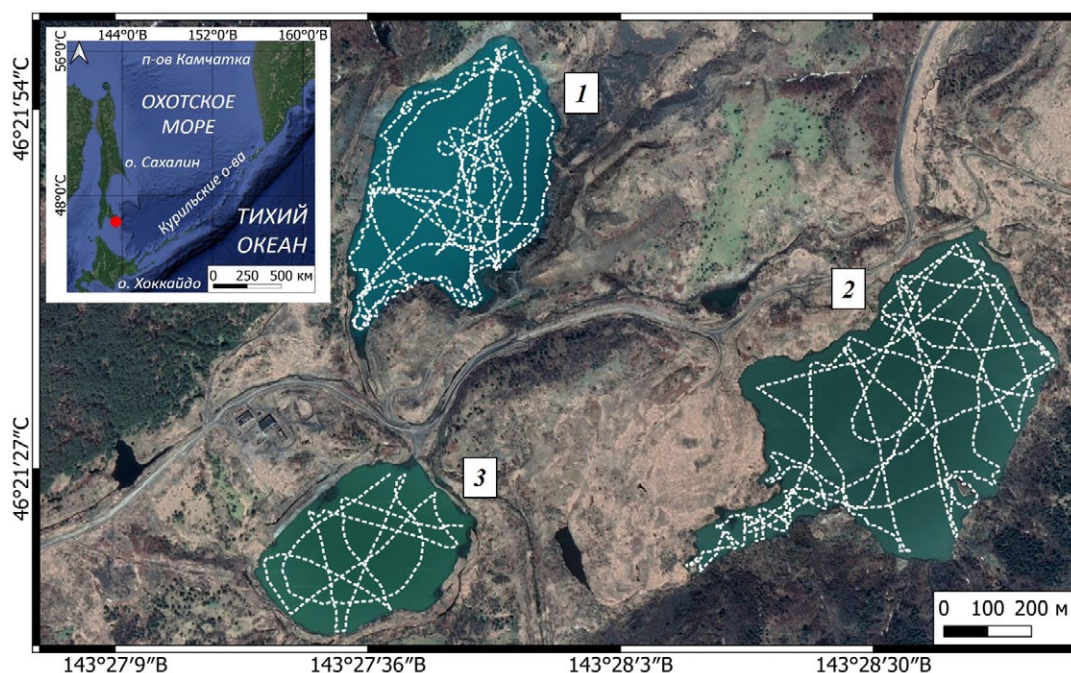


Рис. 1. Схема расположения обследованной группы Новиковских Карьерных озер. 1 – Бирюзовое Карьерное, 2 – Утиное Карьерное, 3 – Зеленое Карьерное. Белыми линиями отмечены треки выполнения эхолотной съемки.

Fig. 1. Location scheme of the surveyed group of the Novikovskiy Karyernye lakes. 1 – Biryuzovoye Karyernoye, 2 – Utinoye Karyernoye, 3 – Zelenoye Karyernoye. The white lines mark the tracks of the echo sounding survey.

* Голубые (Бирюзовые) озера на Сахалине [Blue (Biryuzovye) lakes on Sakhalin]. 2020. URL: <https://www.tourister.ru/world/europe/russia/city/novikovo/lakes/37699>; Описание маршрута «Мыс Евстафия и Бирюзовые озера на Сахалине» [Description of the route «Cape Eustathia and Biryuzovye lakes on Sakhalin»]. 2019. URL: <https://tourism.sakhalin.gov.ru/mys-evstafiya-i-biryuzovye-ozera/>; Места и маршруты для туризма и походов на Сахалине, Корсаковский район [Places and routes for tourism and hiking in Sakhalin, Korsakov district]. URL: <https://idilesom.com/sakh/places?district=7&sortBy=views> (accessed 18.04.2022).

некоторых Новиковских Карьерных озер, однако какие из них даны тому или иному озеру (кроме общепризнанного названия Бирюзовое Карьерное), установить сложно. По этой причине в работе используются авторские наименования двух безымянных водоемов: Утинное Карьерное и Зеленое Карьерное.

Цель данной работы – выявить основные морфологические особенности нескольких крупных Новиковских Карьерных озер в центральной части месторождения германиеносных углей. Задачи исследования: 1) провести рекогносцировочную съемку котловин озер Утинное Карьерное и Зеленое Карьерное с помощью цифрового эхолота; 2) составить батиметрические схемы обследованных озер; 3) уточнить ранее полученные сведения о морфологии для озера Бирюзовое Карьерное, составить обновленную батиметрическую схему.

Материалы и методы исследований

Эхолотные промеры озерных котловин осуществлялись по апробированной методике [3–6]. На легкую моторную лодку CatFish 240 с мотором был установлен эхолот Lowrance LMS-527 сDF iGPS со спутниковой навигацией и привязкой профилей. Точность привязки обеспечивалась 12-канальным спутниковым приемником, малым ходом лодки и частотой излучателя эхолота 200 кГц, шаг съемки 1 м. Всего на Бирюзовом Карьерном озере выполнено около 7 тыс. промеров, общая протяженность батиметрических профилей составила около 10 км; на Утинном Карьерном озере – 8.5 тыс. промеров, протяженность профилей 12 км; на Зеленое Карьерное – 2.2 тыс. промеров, протяженность – 3.5 км.

При обработке полученных эхолотом данных использовали программные пакеты Lowrance Sonar Viewer 2.1.2 (экспорт данных эхолота с привязкой SR-ORG Projection 8230 – Lowrance Mercator), QGIS v. 3.20.3 (перепривязка данных в EPSG:32654 – WGS 84 / UTM zone 54N, измерение поверхностных морфометрических характеристик озера) и Surfer v. 20.0 (построение батиметрической схемы, расчет объема модели котловины озера). Расчет морфометрических характеристик озера проведен по общепринятым методикам [7–10]. Для визуализации батиме-

трических профилей и схем использовался графический инструментальный ПО Lowrance Sonar Viewer и Surfer. Карты и картосхемы составлены с помощью ПО QGIS. В работе использованы свободно распространяемые спутниковые снимки © 2022 Maxar Technologies.

Результаты и обсуждение

Бирюзовое Карьерное озеро

Первое подробное описание современной морфологии Бирюзового Карьерного озера (рис. 2) приведено в работах авторов [3, 4].

В настоящей работе уточнены имеющиеся сведения по данному озеру и их обработка. Обновлена батиметрическая схема озера (рис. 3). Полученные результаты измерений позволили определить более точную максимальную глубину для оз. Бирюзовое Карьерное – 105.5 м.

Таким образом, уточнены сведения о глубочайшем водоеме Сахалина, потеснившим прежнего рекордсмена по глубине – оз. Тунайча (с максимальной глубиной 42 м [11]). Обновлен также и зависящий от максимальной глубины коэффициент емкости – 0.36.

Физико-химический анализ воды оз. Бирюзовое Карьерное, выполненный в сентябре 2021 г., показал [3, 4], что вода не имеет запаха при температуре 20 и 60 °С, относится к слабощелочным (pH 7.8), пресным (0.2 г/дм³), гидрокарбонатно-сульфатным натриево-кальциевым (содержание (в мг/дм³): HCO₃⁻ – 124; SO₄²⁻ – 81; Cl⁻ – 8; Na⁺ – 38; Ca²⁺ – 25; Mg²⁺ – 4.6). Из опробованных компонентов в воде в незначительных количествах содержатся железо (менее 0.05 мг/дм³), растворенный сероводород (менее 0.002 мг/дм³), кремний (менее 1.9 мг/дм³) [3]. Для полной характеристики химизма вод озера необходимы дальнейшие комплексные исследования макро- и микроэлементного состава, что позволит окончательно развеять миф об опасности купаний в этом водоеме из-за большого содержания «солей германия» и других «ядовитых компонентов». На самом деле насыщенный бирюзовый цвет воды, меняющий оттенки и интенсивность в зависимости от погодных условий и освещенности, обусловлен опалесценцией сульфатов и различных взвешенных



Рис. 2. Бирюзовое Карьерное озеро (вид с запада). *Фото Д.Н. Козлова*
Fig. 2. Biryuzovoye Karyernoye lake (view from the west). *Photo by D.N. Kozlov*

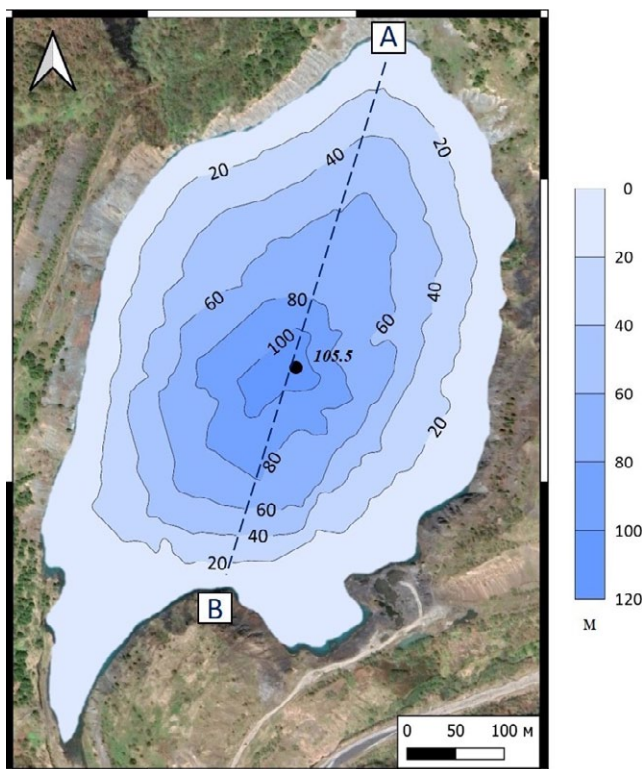


Рис. 3. Батиметрическая схема оз. Бирюзовое Карьерное, изобаты даны через 20 м. Пунктиром отмечено расположение профиля А–В.

Fig. 3. Bathymetric scheme of Biryuzovoye Karyernoye lake, isobaths are given at 20 m intervals. The dotted line in the scheme marks the location of A–B profile.

частиц, что характерно, например, для многих сульфатных вулканогенных кратерных озер Курило-Камчатского региона, имеющих аналогичный цвет воды. Для пресных водоемов юго-восточной части Сахалина в целом характерно наличие сульфатов в воде. Примером может служить оз. Большое Чибисанское, расположенное в 30 км к северу от Новиковских Карьерных озер. Грязевой отжим исследованных в 2016 г. донных отложений прибрежной части этого озера [12] по ионному составу относится к гидрокарбонатно-сульфатному магниево-натриево-кальциевому типу вод (содержание, в мг/дм³: HCO₃⁻ – 158.6; SO₄²⁻ – 316; Cl⁻ – 25.524; Na⁺ + K⁺ – 69.46; Ca²⁺ – 88.176; Mg²⁺ – 29.184) и имеет общую минерализацию 0.688 г/дм³ и pH 6.95 [12].

Утинное Карьерное озеро

Данное озеро является наибольшим по площади во всей группе Новиковских Карьерных озер. Северные берега, поросшие разнотравьем и кустарниками, по преимуществу легко проходимы. Южные формируют небольшие крупнообломочные пляжи, северо-восточная и юго-западная части озера мелководны, обильно развита водная растительность (рис. 4).



Рис. 4. Утиное Карьерное озеро (вид с северо-востока). Фото Р.В. Жаркова
 Fig. 4. Utinoye Karyernoye lake (view from the northeast). Photo by R.V. Zharkov

Несмотря на большую площадь озера, степень выработки карьера здесь оказалась относительно небольшой, а максимальная измеренная эхолотом глубина составила всего 51.5 м (рис. 5).

Зеленое Карьерное озеро

Самое маленькое по площади в обследованной группе озер. Довольно простая овальная форма зеркала в плане, слабая степень развития береговой линии (рис. 6). Северные берега легкодоступны и относительно пологи, с развитой многоярусной растительностью, в то время как южные преимущественно отвесны, заняты лесной растительностью. В наиболее мелководных северной и северо-восточной частях обильная водная растительность. Глубина центральной части озера превышает 60 м, максимально измеренная глубина составила 64.9 м (рис. 7).

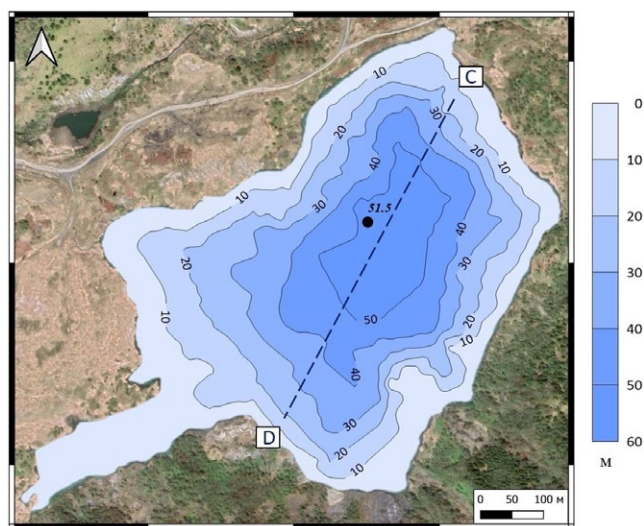


Рис. 5. Батиметрическая схема оз. Утиное Карьерное, изобаты даны через 10 м. Пунктиром отмечено расположение профиля С–D.

Fig. 5. Bathymetric scheme of Utinoye Karyernoye lake, isobaths are given at 10 m intervals. The dotted line in the scheme marks the location of C–D profile.



Рис. 6. Зеленое Карьерное озеро (вид с северо-востока). Фото Ф.А. Романюка
 Fig. 6. Zelenoye Karyernoye lake (view from the northeast). Photo by F.A. Romanyuk

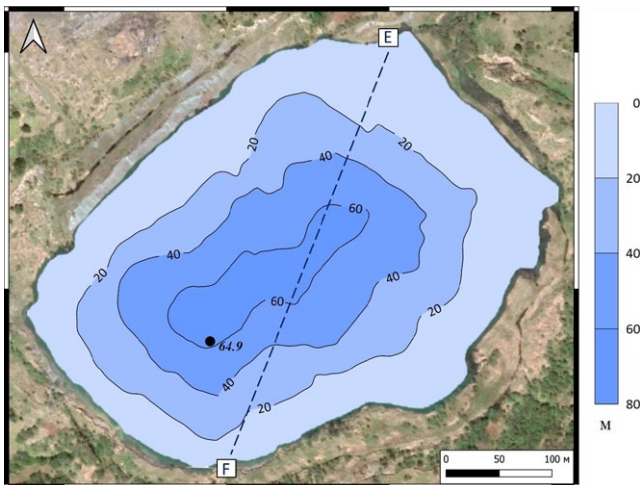


Рис. 7. Батиметрическая схема оз. Зеленое Карьерное, изобаты даны через 20 м. Пунктиром отмечено расположение профиля E–F.
 Fig. 7. Bathymetric scheme of Zelenoye Karyernoye lake, isobaths are given at 20 m intervals. The dotted line in the scheme marks the location of E–F profile.

Сравнительная характеристика исследованных Новиковских Карьерных озер

При описании морфологического облика озер использовались диаметральные батиметрические профили (А–В, рис. 3; С–D, рис. 5;

Е–F, рис. 7), пролегающие через все диапазоны глубин (рис. 8).

Батиметрический профиль оз. Бирюзовое Карьерное ранее уже был описан авторами [3, 4], в целом его можно охарактеризовать как U-образный, с весьма резкими свалами глубин по бортам до отметок более 100 м, особенно выражен перепад глубины в его южной части («В» на профиле рис. 7). На профиле отчетливо прослеживаются многочисленные уступы серпантина дороги для карьерной техники. Пло-

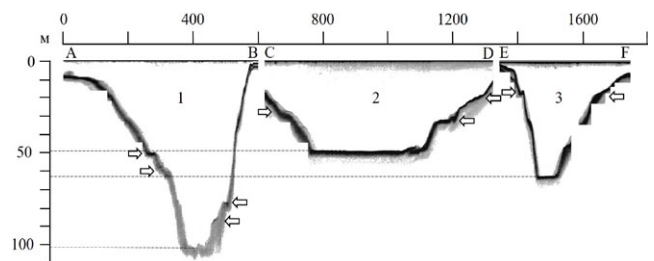


Рис. 8. Батиметрические профили Новиковских Карьерных озер: 1 – Бирюзовое Карьерное, 2 – Утиное Карьерное, 3 – Зеленое Карьерное. Стрелками обозначены подводные уступы.

Fig. 8. Bathymetric profiles of the Novikovskiy Karyernoye lakes: 1 – Biryuzovoye Karyernoye, 2 – Utinoye Karyernoye, 3 – Zelenoye Karyernoye. Arrows indicate underwater ledges.

ская глубинная часть днища котловины весьма небольшая, около 200 м в диаметре. Профиль оз. Утиное Карьерное имеет трапециевидную форму – наиболее характерную для антропогенных карьерных озер [13], на стенках котловины также четко прослеживаются уступы серпантинных дорог. В отличие от оз. Бирюзовое Карьерное, здесь прослеживается четко выраженная и большая в размерах глубинная часть котловины, ее диаметр составляет около 400 м. Батиметрические профили озер Зеленое Карьерное и Бирюзовое Карьерное весьма схожи – геометрически они подобны, и их легко спутать. Характерна конусовидная форма котловины этих антропогенных озер, что весьма типично в природе для вулканогенных кратерных и карстовых озер [6, 13], на стенках котловины также имеются подводные уступы дорог, серпантинном спускающихся на дно карьерной выемки.

Все морфометрические характеристики озер, в том числе и обновленные для Бирюзового Карьерного, представлены в таблице. Ниже приведены некоторые особенности озерных котловин и дана их сравнительная характеристика.

Коэффициент извилистости береговой линии – это весьма показательная характеристика зеркала озера, рассчитываемая по отношению длины береговой линии к длине окружности кру-

га, площадь которого равна площади исследуемого водоема. Сравнивая рассматриваемые озера, можно отметить, что берег оз. Утиное Карьерное наиболее извилист, особенно в выраженной и обособленной юго-западной части водоема. Береговая линия оз. Бирюзовое Карьерное также весьма извилиста, что особенно заметно в расчлененной южной части котловины. Озеро же Зеленое Карьерное, имеющее овальную (и наиболее приближенную к кругу) форму зеркала, обладает близким к единице коэффициентом извилистости.

Площадь водосбора озер существенно различается. Например, у самого глубокого и среднего по площади Бирюзового Карьерного она составляет 0.9 км², а у оз. Утиное Карьерное, при равных с Бирюзовым объемах вод (по 0.008 км³), площадь водосбора более 2 км², а глубина самая маленькая в данной группе водоемов.

Показатель площади водоемов, рассчитанный как отношение площади зеркала к площади водосбора, находится в диапазоне 0.16–0.23, что весьма характерно для небольших искусственных или вулканогенных кратерных водоемов. В соответствии с этим рассчитан и обратный показатель – удельный водосбор, его диапазон 4.29–6.24.

Коэффициент емкости, рассчитанный как отношение средней и максимальной глубины

Таблица. Морфометрические характеристики обследованных озер

Table. Morphometric characteristics of surveyed lakes

Характеристика	Бирюзовое Карьерное	Утиное Карьерное	Зеленое Карьерное
Площадь зеркала, км ²	0.21	0.34	0.13
Высота зеркала н.у.м., м	45	40	40
Коэффициент извилистости береговой линии	1.34	1.50	1.13
Длина береговой линии, км	2.17	3.1	1.44
Длина зеркала, км	0.78	1	0.52
Наибольшая ширина, км	0.4	0.64	0.36
Объем воды, км ³	0.008	0.008	0.0035
Максимальная глубина, м	108.5	51.5	64.9
Площадь водосбора, км ²	0.9	2.12	0.58
Показатель площади	0.23	0.16	0.22
Удельный водосбор	4.29	6.24	4.46
Средняя ширина, км	0.27	0.34	0.25
Средняя глубина, м	38.1	23.5	26.9
Коэффициент емкости	0.36	0.46	0.41
Показатель открытости	0.006	0.014	0.005

у каждого из трех озер, находится в интервале 0.36–0.46. Это говорит о том, что воронкообразные формы котловин озер имеют относительно большие глубины с характерными резкими свалами глубин от берегов к центральной части.

Наряду с описанными особенностями весьма показателен относительно формы котловины показатель открытости, рассчитанный как отношение площади озера к его средней глубине. Все рассмотренные озера являются слабо открытыми (показатель открытости <0.1), что характерно для небольших, но глубоких водоемов.

Потенциал обследованных водоемов как источников пресной воды зависит от нескольких факторов. Если сравнить озера Утиное Карьерное и Бирюзовое Карьерное, можно отметить, что при полуторакратной разнице по площади объем водной массы практически такой же – разница составляет доли процента. Однако различия в морфологии котловин могут обусловить более стабильное длительное существование именно Утиному Карьерному озеру. Неодинаковым может впоследствии оказаться влияние идентичных в целом эрозийных условий и седиментационной обстановки. Так, на больших глубинах при малых площадях изобат затруднено движение водных масс, что впоследствии может способствовать более быстрому накоплению слоя осадков, постепенно повышая уровень дна озера и тем самым сокращая объем водных масс. Это касается Бирюзового Карьерного озера и схожего с ним по строению озера Зеленого Карьерного. Как упомянуто выше, для данных водных объектов характерны такие же, как и для природных расходно-накопительных систем, закономерности лимнических процессов, отмеченные Г.Ю. Верещагиным [14].

Заключение

По результатам проведенных исследований трех Новиковских Карьерных озер были получены данные о морфологии их котловин, рассчитаны морфологические характеристики и составлены батиметрические схемы. Новые данные по оз. Бирюзовое Карьерное подтвердили, что это самый глубокий водоем о. Сахалин: максимальная глубина его составляет 105.5 м. Для озера приведена обновленная ба-

тиметрическая схема с изобатами через 20 м, а также представлены его уточненные морфометрические характеристики. Впервые проведенными батиметрическими исследованиями двух соседних озер, получивших от авторов названия Зеленое Карьерное и Утиное Карьерное, установлены их современные максимальные глубины (64.9 м и 51.5 м соответственно). Составлена сводная таблица морфометрических характеристик трех озер. Проведенные ранее геохимические исследования вод оз. Бирюзовое Карьерное позволили отнести их к пресному гидрокарбонатно-сульфатному магниевому-натриево-кальциевому типу, не имеющему ограничений для купаний в этом озере. Для детальной оценки исследованных озер как источников питьевой воды необходимо в дальнейшем провести комплексные геохимические и гидрологические изыскания.

Список литературы

1. *Недра Сахалинской области* (ред. А.В. Тарасов). 2013. Южно-Сахалинск: Сахалин – Приамурские ведомости, 120 с.
2. Верхотуров А.А., Попова А.А. 2021. Мониторинг нарушенных земель территории Новиковского бурогольного месторождения (юго-восток острова Сахалин). В кн.: *Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения*, 1: 175–180.
3. Козлов Д.Н., Романюк Ф.А., Жарков Р.В. 2021. Новые данные о морфологии котловины и геохимии вод озера Бирюзовое Карьерное (о. Сахалин). *Мониторинг. Наука и Технологии*, 4: 22–26. URL: <http://csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2021-4-06> (дата обращения 5.06.2022).
4. Kozlov D.N., Romanyuk F.A., Zharkov R.V. 2021. Hydroacoustic study of the basin of Biryuzovoe Karyernoe lake (Korsakovsky district, Sakhalin Island). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 946(012026). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012026>
5. Козлов Д.Н., Дегтерев А.В., Зарочинцев В.С. 2018. Кальдерное озеро Кольцевое: современное состояние и строение котловины (о. Онекотан, Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 2(4): 359–364. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.359-364>
6. Козлов Д.Н., Лебедева Е.В., Жарков Р.В. 2019. Строение котловин вулканических озер Ключевого и Штюбеля (кальдера Ксудач, Камчатка). *География и природные ресурсы*, 4: 153–164. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4\(153-164\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(153-164))
7. Верещагин Г.Ю. 1930. Методы морфометрической характеристики озер. *Труды Олонецкой науч. эксп.*, 1: 3–114.
8. Чеботарев А.И. 1953. *Гидрология суши и речного стока*. Л.: Гидрометеиздат, 562 с.
9. Муравьевский С.Д. 1948. Очерки по теории и методам морфометрии озер. *Вопросы географии*, 7: 65–100.

10. Тимофеев Д.А., Уфимцев Г.Ф. (ред.) **2004**. *Морфология рельефа*. М.: Научный мир, 184 с.
11. Бровка П. Ф., Дзен Г. Н. **2016**. Некоторые особенности рельефа и донных осадков озера Тунайча (Южный Сахалин). *Вестник Сахалинского краеведческого музея*, 1: 239–242.
12. Жарков Р.В. **2019**. Физико-химические свойства и перспективы использования сапропелевых грязей озера Большое Чибисанское (остров Сахалин). *Геосистемы переходных зон*, 3(3): 318–324. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.318-324>
13. Шигапов И.С., Мингазова Н.М., Мусин А.Г. **2011**. Особенности морфологии котловин озер г. Казани. *Вестник ТГТУ*, 2(24): 66–71.
14. Верещагин Г.Ю. **1921**. Из результатов исследования озер Пудожского уезда Олонецкой губернии летом 1918 г. *Изв. Российского гидрологического ин-та*, 1–3: 145–157.

References

1. *Nedra Sakhalinskoy oblasti [Subsoil of the Sakhalin Region]* (ed. A.V. Tarasov). **2013**. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin – Primorskies vedomosti, 120 p. (In Russ.).
2. Verkhoturov A.A., Popova A.A. **2021**. Monitoring of disturbed land on the territory of the Novikov brown coal deposit (south-east of Sakhalin Island). In: *Regulirovaniye zemel'no-imushchestvennykh otnosheniy v Rossii: pravovoye i geoprostranstvennoye obespecheniye, otsenka nedvizhimosti, ekologiya, tekhnologicheskiye resheniya [Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate appraisal, ecology, technological solutions]*, 1: 175–180. (In Russ.). <https://doi.org/10.33764/2687-041X-2021-1-175-180>
3. Kozlov D.N., Romanyuk F.A., Zharkov R.V. **2021**. New data on the morphology of basin and water geochemistry of lake Biryuzovoe Karyernoe (Sakhalin island). *Monitoring. Nauka i Tekhnologii = Monitoring. Science and Technologies*, 4: 22–26. (In Russ.). <http://csmos.ru/index.php?page=mnt-iss-2021-4-06>
4. Kozlov D.N., Romanyuk F.A., Zharkov R.V. **2021**. Hydro-acoustic study of the basin of Biryuzovoe Karyernoe lake (Korsakovsky district, Sakhalin Island). *IOP Conf. Series:*

- Earth and Environmental Science*, 946(012026). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012026>
5. Kozlov D.N., Degterev A.V., Zarochintsev V.S. **2018**. Koltsevoe caldera lake: current state and structure of the basin (Onekotan Island, Kuril Islands). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 359–364. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.359-364>
6. Kozlov D.N., Lebedeva E.V., Zharkov R.V. **2019**. Structure of volcanic Lake Klyuchevoe and Lake Stubel basins (Ksudach caldera, Kamchatka). *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*, 4: 153–164. (In Russ.).
7. Vereshhagin G. Yu. **1930**. Methods for the morphometric characterization of lakes. *Trudy Olonetskoy nauchnoy ekspeditsii = Proceedings of the Olonets Scientific Expedition*, 1: 3–114. (In Russ.).
8. Chebotarev A.I. **1953**. *Gidrologiya sushy i rechnogo stoka [Hydrology of land and river flow]*. Leningrad: Gidrometeorizdat, 562 p. (In Russ.).
9. Murav'evskiy S.D. **1948**. [Essays on the theory and methods of lake morphometry]. *Voprosy geografii*, 7: 65–100. (In Russ.).
10. Timofeev D.A., Ufimtsev G.F. (eds) **2004**. *Morfologiya rel'efa [Relief morphology]*. Moscow: Nauchnyy mir, 184 p. (In Russ.).
11. Brovko P.F., Dzen G.N. **2016**. [Some features of the relief and bottom sediments of Lake Tunaicha (Southern Sakhalin)]. *Vestnik Sakhalinskogo kraevedcheskogo muzeya = Bulletin of the Sakhalin museum of local lore*, 1: 239–242. (In Russ.).
12. Zharkov R.V. **2019**. Physical and chemical properties and prospects of use of sapropelic mud of the Bolshoe Chibisan-skoe Lake (Sakhalin Island). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(3): 318–324. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.318-324>
13. Shigapov I.S., Mingazova N.M., Musin A.G. **2011**. Features of the morphology of the basins of the lakes of Kazan. *Bulletin of TSHPU*, 2 (24): 66–71. (In Russ.).
14. Vereshhagin G.Yu. **1921**. [From the results of study of the lakes of the Pudozh district of the Olonets province in the summer of 1918]. *Izv. Rossiyskogo gidrologicheskogo instituta [Proceedings of the Russian Hydrological Institute]*, 1-3: 145–157. (In Russ.).

Об авторах

Сотрудники лаборатории вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск:

Романюк Федор Александрович (<https://orcid.org/0000-0003-1581-1503>), младший научный сотрудник, f.romanyuk2011@gmail.com

Козлов Дмитрий Николаевич (<https://orcid.org/0000-0002-8640-086X>), кандидат географических наук, старший научный сотрудник, kozlovdn@bk.ru

Жарков Рафаэль Владимирович (<https://orcid.org/0000-0002-9753-0627>), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, rafael_zharkov@mail.ru

Поступила 14.04.2022
После доработки 30.07.2022
Принята к печати 05.08.2022

About the Authors

Employees of the Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk:

Romanyuk, Fedor A. (<https://orcid.org/0000-0003-1581-1503>), Junior Researcher, f.romanyuk2011@gmail.com

Kozlov, Dmitriy N. (<https://orcid.org/0000-0002-8640-086X>), Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, kozlovdn@bk.ru

Zharkov, Rafael V. (<https://orcid.org/0000-0002-9753-0627>), Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, rafael_zharkov@mail.ru

Received 14 April 2022
Revised 30 July 2022
Accepted 5 August 2022



Пространственная структура приливов у юго-западного побережья Камчатки по данным береговых наблюдений и спутниковой альтиметрии

Г. В. Шевченко^{*1,2}, А. Т. Цой¹

*E-mail: shevchenko_zhora@mail.ru

¹ Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск, Россия

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

Реферат. На основе известных данных об амплитудах и фазах основных приливных волн в береговых пунктах юго-западной Камчатки проанализирована их вдольбереговая изменчивость. Показано, что амплитуды и фазы волн возрастают в направлении с юга на север. Однако точно оценить эти вариации сложно из-за того, что береговые измерители уровня, которые были установлены, как правило, в эстуариях рек, испытывали искажающее влияние донного трения. Для более точной характеристики пространственной изменчивости величины приливов привлечены данные спутниковой альтиметрии. Эти данные были получены при пролетах ИСЗ ТОРЕХ/Poseidon в 1992–2002 гг. по исходным орбитам и в 2002–2005 гг. по орбитам, смещенным на половину межтрекового расстояния. Выявлено, что амплитуды как суточных, так и полусуточных волн резко возрастают в северном направлении, причем это увеличение ограничено зоной шельфа юго-западной Камчатки. Значительные пространственные вариации характеристик приливных волн являются причиной сильных вдольбереговых течений в данном районе. Оценки, полученные на основе расчета разности прилива в точках различных подспутниковых треков, показали, что скорость прибрежного потока может достигать 1–1.3 узла. Главный вклад в формирование приливных течений дают суточные составляющие.

Ключевые слова: приливы, суточные и полусуточные приливные волны, амплитуды, фазы, береговые наблюдения, спутниковая альтиметрия

Spatial structure of the tides near the southwestern coast of Kamchatka according to coastal observations and satellite altimetry data

Georgy V. Shevchenko^{*1,2}, Alexander T. Tsoy¹

*E-mail: shevchenko_zhora@mail.ru

¹ Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

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

Abstract. Based on the known data on the amplitudes and phases of the main tidal waves in coastal areas of southwestern Kamchatka, their alongshore variability was analyzed. It is shown that they increase from south to north. However, it is difficult to accurately assess these variations due to the fact that coastal tide gauges, which were usually installed at the mouths of rivers, are affected by the distorting effect of bottom friction. Satellite altimetry data were used for a more accurate characterization of the spatial variability of tide magnitude. These data were obtained during the passes of the TOPEX/Poseidon satellite in 1992–2002 on the original and 2002–2005 on the orbits shifted by half the inter-track distance. The amplitudes of both diurnal and semidiurnal waves have been revealed to increase sharply in the north direction, and this increase is limited by the shelf zone of southwestern Kamchatka. Significant spatial variations in the tidal wave characteristics are the cause of strong alongshore currents in this area. Estimates obtained on the basis of calculating the difference in the tidal level at the points of various sub-satellite tracks have shown that the speed of the coastal flow can reach 1–1.3 knot. The main contribution to the formation of tidal currents is made by diurnal components.

Keywords: tides, diurnal and semidiurnal tidal waves, amplitudes, phases, coastal observations, satellite altimetry

Для цитирования: Шевченко Г.В., Цой А.Т. Пространственная структура приливов у юго-западного побережья Камчатки по данным береговых наблюдений и спутниковой альтиметрии. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 3, с. 246–255. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.246-255>; <https://www.elibrary.ru/dgwmst>

For citation: Shevchenko G.V., Tsoy A.T. Spatial structure of the tides near the southwestern coast of Kamchatka according to coastal observations and satellite altimetry data. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 246–255. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.246-255>; <https://www.elibrary.ru/dgwmst>

Благодарности и финансирование

Авторы благодарят уважаемых рецензентов, чьи рекомендации позволили улучшить текст этой статьи.

Acknowledgements and Funding

The authors would like to thank the respected Reviewers whose recommendations allowed to improve the text of this article.

Введение

Пространственной структуре приливов в Охотском море посвящен ряд работ, основанных на анализе наблюдений на береговых станциях [1–3], численном моделировании [4–6], а также данных спутниковой альтиметрии [7, 8]. Из этих работ следует, что важную роль в формировании приливных движений в масштабах моря играют процессы в его юго-восточной части, примыкающей к северным Курильским островам и юго-западному побережью п-ова Камчатка, так как приливные волны проникают в него из Тихого океана прежде всего в этом районе. Особенности пространственной изменчивости амплитуд и фаз основных приливных волн на этом участке бассейна мало изучены и представляют существенный интерес. Помимо этого данная задача имеет и выраженный прикладной аспект. Приливы во многом определяют воз-

можности выхода рыболовного флота в море из устьев рек, где расположено большинство населенных пунктов и рыбоперерабатывающих предприятий, что в большинстве случаев возможно только на полной воде прилива. Тем самым колебания уровня моря оказывают существенное влияние на хозяйственную деятельность в одной из важнейших рыбопромысловых зон Дальневосточного региона, точное знание их характеристик и правильный расчет позволяют снизить ущерб от неоправданного простоя судов.

В большинстве таких пунктов измерения уровня моря продолжительностью 0.5–2 мес. были выполнены в первой половине прошлого века, и на их основе были рассчитаны гармонические постоянные главных приливных волн (они приведены в работах [1, 2] и ниже в таблице, положение станций показано на рис. 1). Измерения производились в устьях рек, в которых

Таблица. Гармонические постоянные главной суточной K1 и полусуточной M2 приливных волн в береговых пунктах юго-западной Камчатки (данные по [1, 2])

Table. Harmonic constants of the main diurnal K1 and semidiurnal M2 tidal waves in the coastal points of southwestern Kamchatka (data according to [1, 2])

Пункт	Широта	Долгота	HK1, см	GK1, °	HM2, см	GM2, °
р. Ича (пос. Ичинский)	55°37.3'	155°36.8'	63.5	32.2	62.1	278.4
пос. Крутогоровский	55°02.8'	155°35.0'	79.2	19.7	74.6	260.7
р. Крутогорова	55°02.8'	155°35.1'	52.1	31	37	299
р. Колпаковка	54°48.0'	155°38.5'	55.2	19.4	45.3	275.5
пос. Кировский	54°13.6'	155°48.4'	77	15.5	66.3	249.9
р. Воровская	54°10.9'	155°49.7'	71.4	17.5	61.1	260.4
р. Кихчик	53°29.0'	156°01'	70.4	6.7	63.1	239.6
Микояновский рыбокомбинат	52°40'	156°15'	55.5	25.5	35.5	218.5
р. Большая, устье	52°33.1'	156°17.9'	44.8	5.6	39.5	232.3
пос. Опала	51°59'	156°29'	46.1	6.3	40.5	209.1
р. Опала, устье	51°58.0'	156°29.2'	24.3	11.2	17.7	238.4
пос. Озерновский	51°29.7'	156°29.2'	38.7	15.2	34.2	249.7
р. Озерная, устье	51°29.8'	156°29.5'	25.7	8.9	13.8	237.8



Рис. 1. Положение береговых пунктов, в которых известны гармонические постоянные основных приливных волн.

Fig. 1. The location of coastal points where the harmonic constants of the main tidal waves are known.

приливные колебания в разной степени искажаются влиянием песчаных баров, отгораживающих эстуарии от моря. Как показали инструментальные измерения длинноволновых процессов в районе пос. Озерновский [9, 10], различия амплитуд и фаз в открытом море и во внутренней акватории могут быть весьма существенными. Поэтому сведения о характеристиках приливных волн, не искаженных мелководными эффектами, интересны с точки зрения их пространственной изменчивости, а также имеют важное прикладное значение для обеспечения погрузо-разгрузочных работ судов рыболовного и торгового флота, при проектировании промышленных объектов на побережье, для геодезии и картографии [11],

и т.д. Ввиду большой важности точных сведений о характеристиках прилива для хозяйственной деятельности, постоянно появляются работы, посвященные их уточнению по многолетним рядам наблюдений (в качестве примера можно привести такое исследование для побережья Финского залива [12]), но на охотоморском побережье Камчатки наблюдения за уровнем в последние десятилетия не проводятся, если не считать установки датчика Службы предупреждения о цунами в пос. Озерновский.

Возможность получения необходимых данных об амплитудах и фазах приливных составляющих предоставляет спутниковая альтиметрия, методика расчета указанных параметров в точках подспутниковых треков приведена в работе [7]. Как показано в более позднем исследовании [8], расчеты на основе данных искусственного спутника Земли TOPEX/Poseidon (ИСЗ Т/Р) оказались наиболее точными по сравнению с другими спутниками (остаточная дисперсия была меньше, чем при оценках по данным спутников Jason и Envisat, не говоря об ERS, альтиметры которых характеризовались наиболее значительными погрешностями). Причем качественные оценки были получены не только по 10-летнему ряду (1992–2002 гг.), но и по более короткому, когда орбиты ИСЗ Т/Р были смещены на половину межтрекового расстояния (2002–2005 гг.), хотя здесь имелись определенные нюансы, которые обсуждаются ниже. Обзор современных представлений о возможностях использования данных альтиметрии для анализа приливов приведен в [13].

В данной работе вдольбереговые вариации амплитуд и фаз главных приливных волн суточного и полусуточного диапазона рассмотрены на основе данных береговых станций, более общее исследование их пространственной изменчивости выполнено с использованием данных альтиметра ИСЗ Т/Р по исходным и смещенным трекам.

Изменения гармонических постоянных приливов вдоль западного берега Камчатки

В таблице представлены значения амплитуд и фаз главных суточной K1 и полусуточной M2 волн по [1, 2], а также полученные при проведении натурального эксперимента по

измерению длинных волн в районе пос. Озерновский со стороны открытого моря [9, 10]. Фазы приведены в Гринвичском времени, так как в этом времени даны анализируемые ниже данные спутниковой альтиметрии. Начнем рассмотрение вдольбереговых вариаций амплитуд и фаз основных приливных волн с их сравнения в эстуариях рек и на открытых участках побережья, которые имеются для населенных пунктов Опала и Озерновский.

Обращает на себя внимание существенное уменьшение амплитуд главных приливных волн M2 и K1 во внутренней акватории по сравнению с полученными на открытых участках побережья. Так, в пункте Опала их величины в эстуарии составили 43.7 и 52.7 % от значений на внешней станции (в абсолютном выражении они были меньше на 22.8 и 21.8 см соответственно), хотя расстояние между уровнями постами было невелико (около 1 мин по широте).

Для пос. Озерновский аналогичный расчет дал близкие соотношения – 40.6 и 66.4 % в относительном и 20.4 и 15.9 см в абсолютном выражении. Фазовые сдвиги, в особенности для суточных волн, менее существенны. Этот пример показывает важность проблемы – при таких обстоятельствах находящиеся на рейде суда или рыбодобывающий флот не могут ориентироваться на характеристики прилива, рассчитанные по измерениям во внутренних акваториях, это обстоятельство существенно осложняет заход в эстуарий и выход судов в море.

На рис. 2 приведены графики вдольбереговых вариаций амплитуд и фаз главных суточной и полусуточной волн по данным береговых измерений. Юго-западный берег Камчатки имеет ориентацию, близкую к меридиональ-

ной, поэтому данные о широте пунктов измерения уровня были пересчитаны в расстояния, отсчитанные от пос. Озерновский на юге до пос. Ичинский на севере (расстояние между ними чуть менее 450 км). На графики не наносились данные, полученные в устьях рек, если они имели ту же широту, что и полученные на более открытых участках побережья (реки Крутогорова, Воровская, Опала и Озерная).

Из рис. 2 видно значительное нарастание амплитуды и фазы обеих волн в направлении с юга на север. Для главной полусуточной составляющей прилива M2 средняя скорость увеличения амплитуды составляет около 8 см на 100 км, фазы – на 15°. Для суточной гармонике K1 эти цифры несколько меньше, около 7 см и 5° на такое же расстояние.

Хотя общая тенденция хорошо просматривается, влияние отмеченных выше эффектов, обусловленных сложностью измерений уровня на открытых участках юго-западного побережья Камчатки, не позволяет установить точную картину пространственной изменчивости амплитуд и фаз главных приливных волн в данном районе. Обращает на себя особое внимание резкое снижение амплитуд обеих волн K1 и M2 в устье р. Колпаковка, хотя в устье р. Крутогорова, данные по которой не представлены на графике, уменьшение амплитуд приливных волн еще более существенное (см. таблицу). Отметим, что, как и в южной части изучаемого побережья, в устьях указанных рек на северном участке фазовые сдвиги не такие значительные, как уменьшение амплитуд. Для более точной оценки пространственной изменчивости характеристик прилива были использованы материалы дистанционных измерений.

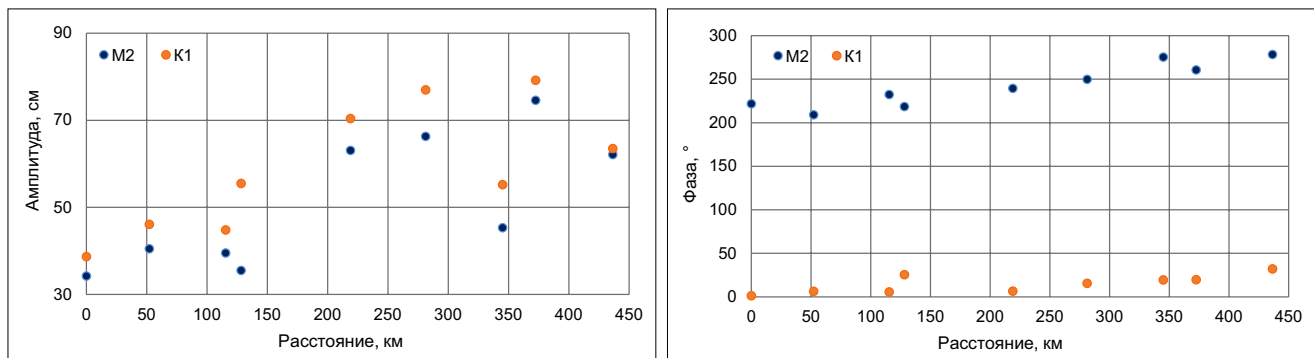


Рис. 2. Вариации амплитуды (в см, рисунок слева) и фазы (в °GMT, справа) главных суточной и полусуточной волн K1 и M2 вдоль юго-западного берега Камчатки от пос. Озерновский (принят за 0) до пос. Ичинский.

Fig. 2. Variations in the amplitude (in cm, left) and phase (in °GMT, right) of the main diurnal K1 and semidiurnal M2 tidal waves along the southwestern coast of Kamchatka from the Ozernovsky village (taken as zero) to the Ichinsky village.

Пространственная изменчивость амплитуд и фаз основных приливных волн по данным спутниковой альтиметрии

На рис. 3 показаны точки подспутниковых треков ИСЗ Т/Р, в которых методом наименьших квадратов [7] были рассчитаны амплитуды и фазы 8 основных приливных волн – 4 суточного (Q1, O1, P1, K1) и 4 полусуточного диапазона (N2, M2, S2, K2). Синим цветом отмечены номера восходящих, красным – нисходящих треков, пересекающих изучаемую область. Чтобы рассчитать набор гармоник для всех точек, необходимо, чтобы для ряда данных было не менее 90 значений. Зеленым цветом отмечены «старые» треки, соответствующие орбитам, по которым ИСЗ Т/Р дви-

гался в 1992–2002 гг., желтым – «новые», отвечающие орбитам 2002–2005 гг., смещенные на половину межтрекового расстояния. Для последних расчеты выполнялись для 6 волн, суточная P1 и полусуточная K2 составляющие не рассматривались, так как из-за близости их частот с частотами гармоник K1 и S2 оценки их характеристик были неустойчивыми (длины рядов составляли 60–80 отсчетов). При этом на качество расчета амплитуд и фаз основных волн исключение этих составляющих не повлияло. Длина рядов в точках «старых» треков превышала 400 значений, что позволяло вычислить амплитуды и фазы всех основных волн, не прибегая к искусственным приемам даже в прибрежных точках, несмотря на то что при пролете ИСЗ вблизи береговой границы обычно теряется часть данных и ряды более короткие, чем в более удаленных (минимальная длина в точке 735732 трека 236 составила 290 отсчетов).

Высокая плотность данных, полученных в точках с учетом как «старых», так и «новых» треков, позволила построить качественные карты пространственной изменчивости амплитуд и фаз главных суточной (K1, рис. 4) и полусуточной (M2, рис. 5) приливных волн.

В районе северных Курильских островов со стороны Тихого океана амплитуда волны K1 принимает наименьшие значения (около 30 см), примерно такие же значения и в удаленной от берега части Охотского моря на юго-западе изучаемой акватории.

В районе северных Курильских островов со стороны Тихого океана амплитуда волны K1 принимает наименьшие значения (около 30 см), примерно такие же значения и в удаленной от берега части Охотского моря на юго-западе изучаемой акватории.

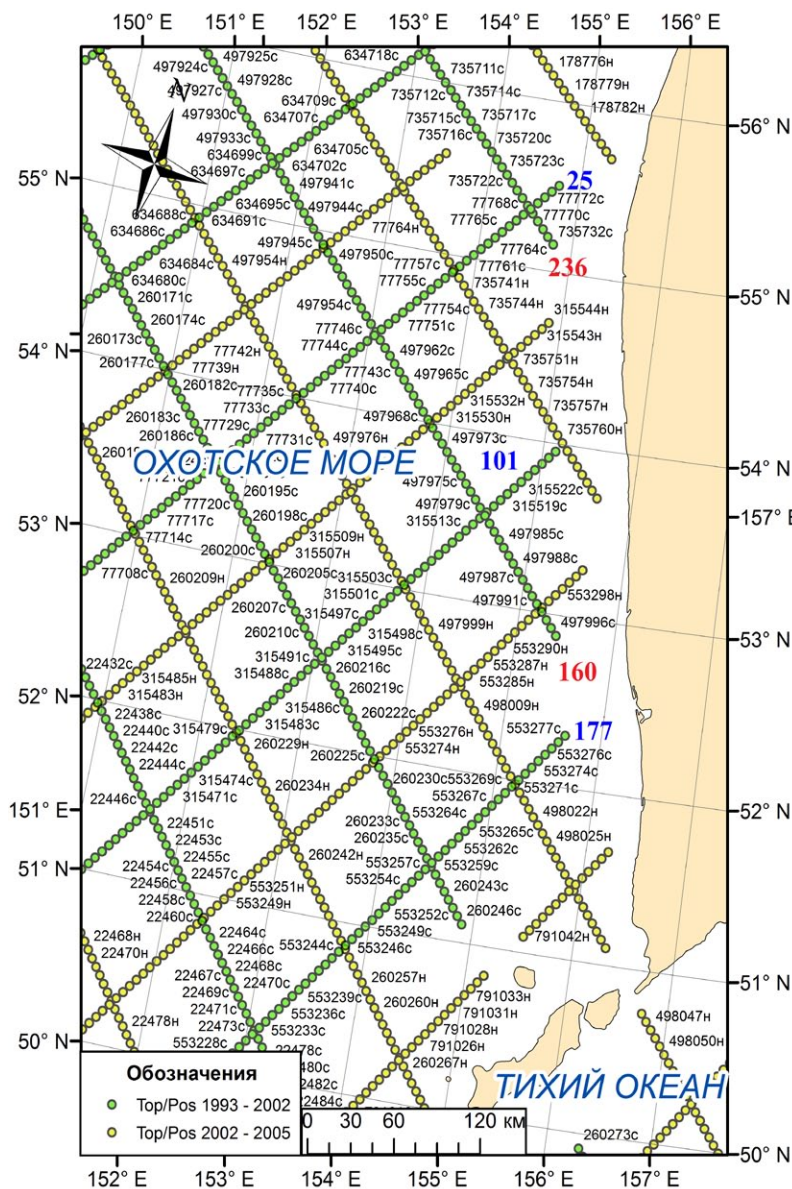


Рис. 3. Точки подспутниковых треков ИСЗ Т/Р, в которых были рассчитаны амплитуды и фазы основных приливных волн (зелеными кружками отмечены соответствующие орбитам 1992–2002 гг., желтыми – 2002–2005 гг.). Синим цветом отмечены номера восходящих, красным – нисходящих треков, пересекающих изучаемую область.

Fig. 3. Points of sub-satellite tracks of the T/P satellite, in which the amplitudes and phases of the main tidal waves were calculated (green circles correspond to the orbits of 1992–2002, yellow – 2002–2005). The numbers of ascending tracks crossing the study area are highlighted in blue, and the numbers of descending ones are highlighted in red.

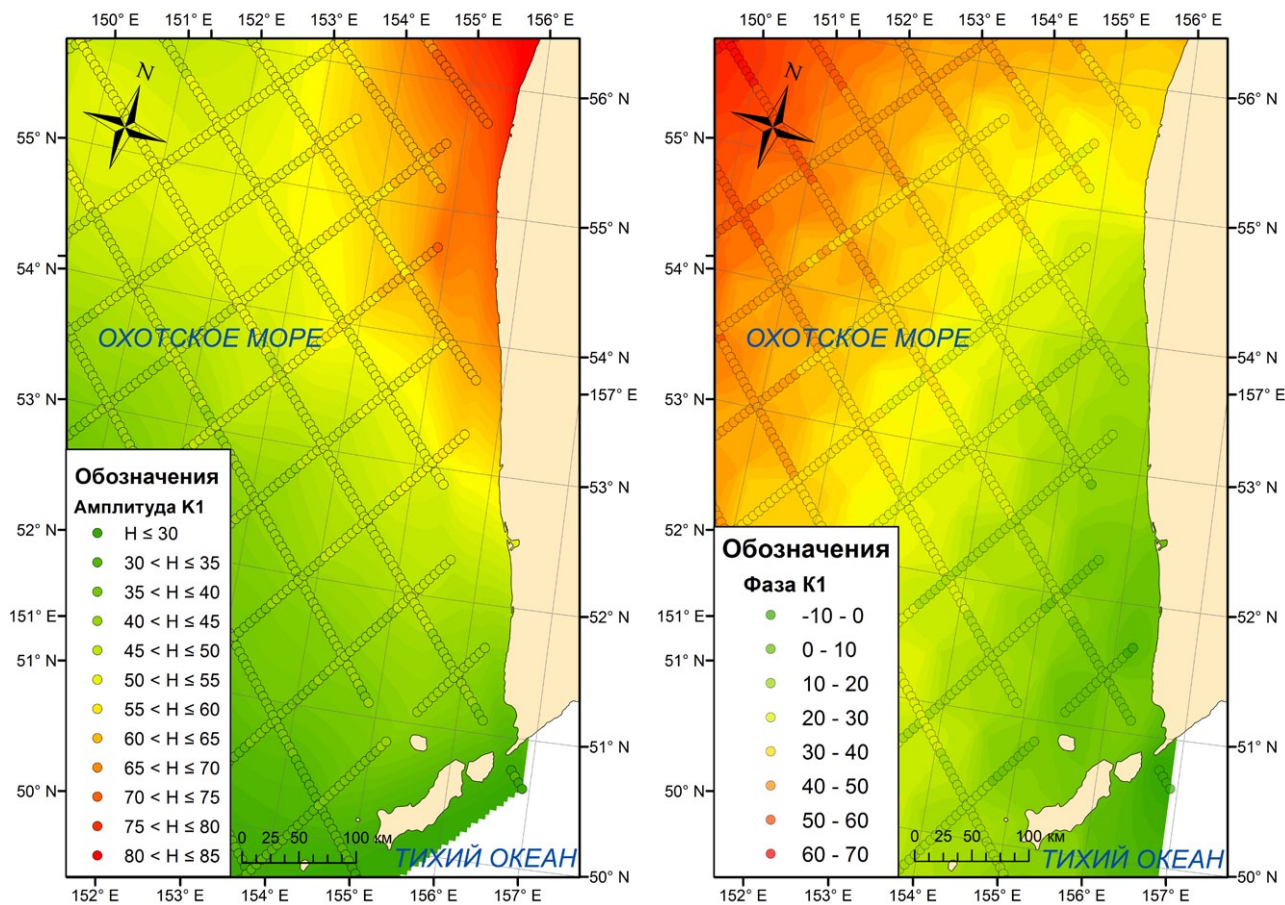


Рис. 4. Пространственная структура амплитуды (слева, в см) и фазы (справа, в °GMT) главной суточной приливной волны K1 по данным альтиметра ИСЗ Т/Р.

Fig. 4. Spatial structure of the amplitude (left, in cm) and the phase (right, in °GMT) of the main diurnal tidal wave K1 according to the T/P satellite altimeter data.

Ее значения возрастают в прибрежной полосе в северном направлении, особенно резко в районе 53° с.ш. В северной части района значения амплитуды этой составляющей превышают 80 см, т.е. она увеличивается почти в 3 раза по сравнению с прибрежными районами северных Курильских островов. Ширина этой полосы составляет около 2° по долготе ($154\text{--}156^{\circ}$ в.д.), охватывая зону весьма широкого в данном районе шельфа. За ее пределами амплитуда убывает до примерно 50 см в открытом море. Фаза этой волны возрастает от близких к нулю значений на юго-востоке рассматриваемой области до $40\text{--}50^{\circ}$ в северо-западной. Такой характер ее вариаций указывает на распространение волны от о. Парамушир в направлении центра Охотского моря, однако картина достаточно сложная. Это заметно и на более общей карте в масштабах всего бассейна, на которой видно, что волна, войдя через прол. Крузенштерна, огибает Парамушир и поворачивает на северо-запад [7].

Пространственное распределение амплитуды полусуточной волны M2 сходно с рассмотренным выше для волны K1. Только быстрое ее возрастание вблизи берега начинается несколько севернее, в районе 54° с.ш., и ее значения быстрее убывают по мере удаления от берега в направлении открытого моря. Распределение фазы носит более простой характер и характеризуется ее закономерным и достаточно быстрым возрастанием от северных Курильских островов в направлении центральной части моря.

Таким образом, анализ данных спутниковой альтиметрии показал, что вдольбереговая изменчивость характеристик главных приливных волн вдоль юго-западного берега Камчатки носит закономерный характер монотонного возрастания в направлении с юга на север. Скачкообразные вариации амплитуд и фаз по береговым данным, очевидно, обусловлены влиянием локальных топографических условий.

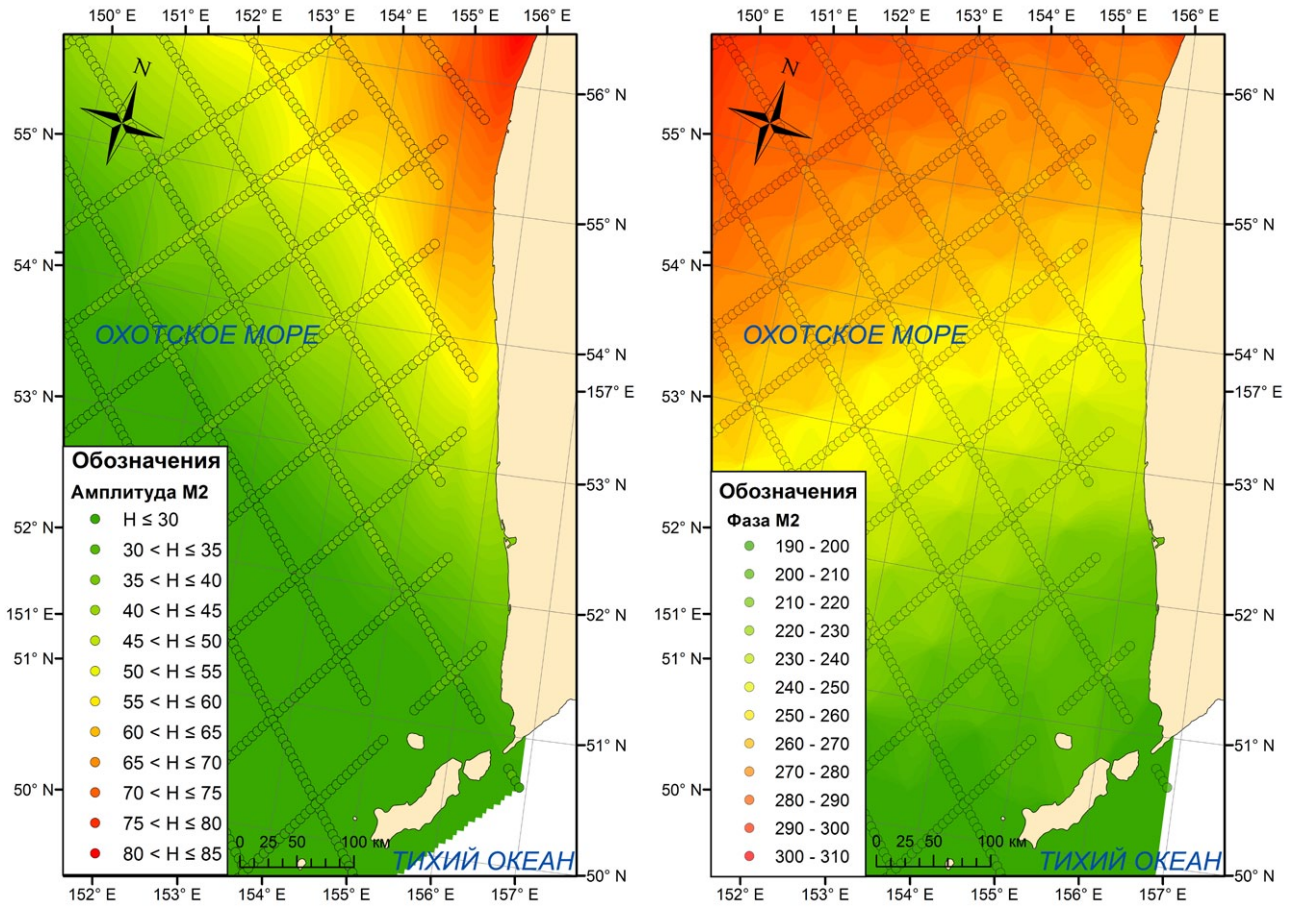


Рис. 5. Пространственная структура амплитуды (слева, в см) и фазы (справа, в °GMT) главной полусуточной приливной волны M2 по данным альтиметра ИСЗ Т/Р.

Fig. 5. Spatial structure of the amplitude (left, in cm) and the phase (right, in °GMT) of the main semidiurnal tidal wave M2 according to the T/P satellite altimeter data.

Оценка скорости приливных течений

Для акваторий, характеризующихся значительной пространственной изменчивостью величины приливов, большой интерес представляет также возможность оценки скоростей приливных течений на основе полученных гармонических постоянных для уровня моря. В работе [7] для реализации этой задачи на основе оценок приливных колебаний уровня вблизи северо-западного побережья Камчатки использовалось следующее уравнение движения в упрощенной форме, которое обычно используют для оценки приливных потоков в каналах (без учета членов, отражающих влияние вращения Земли и нелинейных эффектов):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x},$$

где u – скорость, t – время, g – ускорение свободного падения, ζ – отклонение уровня

поверхности от положения равновесия, x – пространственная переменная. Для расчета скоростей течений были выбраны несколько пар точек на «старых треках», в которых длина рядов была не менее 290 значений и в которых были надежно определены гармонические постоянные 8 основных приливных волн.

Расчет скорости течений выполнялся для достаточно большого набора пар точек, из которых наибольшего внимания заслуживают концевые (наиболее близкие к юго-западному берегу Камчатки) точки восходящих треков 25 (точка TP77782), 101 (TP315526) и 177 (TP553278), а также нисходящих – 160 (TP497996) и 236 (TP735732) (см. рис. 3).

На основе рассчитанных по альтиметрическим данным гармонических постоянных приливов были предвычислены приливные ряды длительностью 1 год. Расчет производился для 2026 г., который для районов с преобладанием суточных приливов будет годом

«больших приливов» в рамках хорошо выраженной цикличности с периодом 18.6 года. 2022 г. также относится к периоду высоких значений величины приливных колебаний (дисперсия примерно на 3 % меньше, чем в 2026, экстремальные высоты различаются на 1–3 см в зависимости от выбранной точки). В годы «малых приливов» (ближайший период низкой интенсивности приливных колебаний ожидается в 2032–2033 гг.) дисперсия приливных колебаний на 30 % ниже, чем в 2026 г., а различия в экстремальных высотах достигают 25–30 см.

Разностная аппроксимация пространственной производной по уровню вычислялась как разность значений приливного уровня в соседних точках в одни и те же моменты времени, поделенная на расстояние между ними. Приливные скорости определялись по схеме первых разностей, отнесенных к временному интервалу 1 ч. При интегрировании уравнения возникает неопределенная константа, которая выбиралась таким образом, чтобы среднее значение скорости по всему ряду равнялось нулю. Полученные результаты представлены на рис. 6 и 7.

В вариациях скорости течений наблюдается типичная для районов с преобладанием суточных приливов сезонная (с увеличением интенсивности на дни зимнего и летнего солнцестояний и уменьшением на дни весеннего и осеннего равноденствий), а также полумесячная изменчивость, характерная для тропических и экваториальных приливов. Максимальная амплитуда скорости была получена при расчете для северной части изучаемого района (концевые точки восходящих 25 и 101 треков – TP77782 и TP315526), она составляет около 65 см/с, что является значительной величиной для акваторий, удаленных от проливов, выдающихся в море мысов или иных особенностей локальной топографии.

Немного меньше скорости приливных течений, рассчитанные

по разности прилива в концевых точках нисходящих треков 236 (TP735732) и 160 (TP497996). Фрагмент полученного ряда за январь 2026 г. приведен на рис. 7. Полученные оценки относятся приблизительно к середине отрезка между выбранными точками, к центральной части изучаемого района. Главный вклад в приливные течения дают суточные составляющие, это хорошо видно из рис. 7. Вклад полусуточных волн в формирование поля течений невелик, он становится заметен только в период ослабления вклада суточных волн при экваториальных приливах.

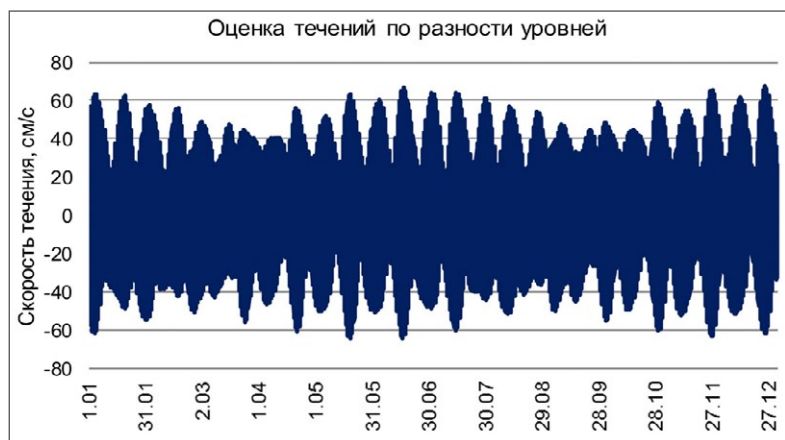


Рис. 6. Вариации скоростей приливных течений, рассчитанных по разности приливных колебаний уровня в точках TP77782 и TP315526 по предвычислению на 2026 г.

Fig. 6. Variations in the velocities of tidal currents calculated from the difference in tidal level fluctuations at the points TP77782 and TP315526 according to the prediction for 2026.



Рис. 7. Вариации скоростей приливных течений, рассчитанных по разности приливных колебаний уровня в точках TP735732 и TP497996 по предвычислению на январь 2026 г.

Fig. 7. Variations in the velocities of tidal currents calculated from the difference in tidal level fluctuations at the points TP735732 and TP497996 according to the prediction for January 2026.

Более заметное уменьшение амплитуды приливных течений, до 55 см/с, наблюдается в южной части изучаемого района (оценка получена для концевых точек треков 101 и 177), но и здесь скорости вдольбереговых приливных потоков являются аномально высокими.

Заключение

В результате анализа изменений амплитуд и фаз основных приливных волн вдоль юго-западного побережья Камчатки на основе известных оценок, полученных по данным наблюдений в береговых пунктах [1, 2], выявлено существенное возрастание этих параметров с юга на север (как для суточных, так и для полусуточных приливов). Однако получить точную характеристику возрастания оказалось затруднительно из-за того, что большинство измерений выполнялось в эстуариях рек, в различной степени отделенных от моря песчаными барами, что приводит к значительному искажению характеристик прилива, главным образом к уменьшению амплитуд по сравнению с близко расположенными пунктами наблюдения на более открытых участках побережья. Наиболее существенны эти искажения для устьев рек Озерная, Опала и Крутогорова, где амплитуды уменьшались в 1.5–2 раза. Из-за этого возникает ложное впечатление о немонотонном возрастании характеристик главных приливных волн.

Детальные карты пространственной изменчивости амплитуд и фаз основных приливных волн, построенные по результатам гармонического анализа данных альтиметра ИСЗ ТОРЕХ/Poseidon, дают более объективную картину. Амплитуды как суточных, так и полусуточных волн резко, почти в 3 раза, возрастают в северном направлении (начиная с 53° с.ш. в первом и с 54° во втором случае) для главных составляющих K1 и M2, причем это увеличение ограничено зоной весьма протяженного шельфа юго-западной Камчатки. На удалении от берега этот эффект выражен существенно слабее.

Фазы полусуточных волн равномерно возрастают с юга на север, указывая направление их распространения от проливов Курильской гряды в северную часть Охотского моря. Фазовый сдвиг в пределах изучаемой акватории достигал 110° (немногим менее 4 ч). Фазы суточных волн возрастают от о. Парамушир в северо-западном направлении, что соответ-

ствует направлению их распространения в центральную часть данного бассейна. Максимальный сдвиг фаз составляет около 60°, или те же примерно 4 ч. Значительные пространственные вариации амплитуд и фаз приливных волн являются причиной сильных вдольбереговых течений у юго-западного побережья Камчатки. Оценки, полученные на основе расчета разности приливного уровня в точках различных подспутниковых треков, показали, что скорость прибрежного потока может достигать 1–1.3 узла и главный вклад в формирование приливных течений вносят суточные составляющие.

Список литературы

1. *Таблицы приливов. Воды азиатской части СССР и прилегающих зарубежных районов.* 1960. Л.: Гидрометеоздат, 29 с.
2. Деева Р.А. 1970. *Уровень Охотского моря.* Л., 530 с. (Труды ГОИН; 15).
3. Sudzuki K., Kanari S. 1986. Tides in the Sea of Okhotsk. *Marine Science*, 18(7): 445–463.
4. Kowalik Z., Polyakov I. 1998. Tides in the Sea of Okhotsk. *Physical Oceanography*, 28(7): 1389–1409. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1998\)028<1389:titsoo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<1389:titsoo>2.0.co;2)
5. Choi B.H., Kim. D.H., Fang Y. 1999. Tides in the East Asian seas from a fine-resolution global ocean tide model. *Marine Technology Society J.*, 33(1): 36–44. <https://doi.org/10.4031/mts.j.33.1.5>
6. Некрасов А.В., Романенков Д.А. 2003. Прогностическая оценка приливных колебаний уровня при крупномасштабном гидротехническом строительстве на побережье Белого и Охотского морей. В кн.: *Колебания уровня в морях.* Санкт-Петербург: РГГМУ, с. 57–78.
7. Шевченко Г.В., Романов А.А. 2004. Определение характеристик прилива в Охотском море по данным спутниковой альтиметрии. *Исследование Земли из космоса*, 1: 49–62.
8. Шевченко Г.В., Романов А.А. 2008. Энергетические характеристики приливных и неперидических колебаний уровня Охотского моря по данным спутниковой альтиметрии. *Исследование Земли из космоса*, 6: 67–76.
9. Ковалев П.Д., Рабинович А.Б., Ковбасюк В.В. 1989. Гидрофизический эксперимент на юго-западном шельфе Камчатки (КАМШЕЛ-87). *Океанология*, 29(5): 738–744.
10. Ковалев П.Д., Шевченко Г.В. 2008. *Экспериментальные исследования длинноволновых процессов на северо-западном шельфе Тихого океана.* Владивосток: Дальнаука, 216 с.
11. Гусев И.В., Лебедев С.А. 2013. Учет влияния океанических приливов при наблюдении геодезических искусственных спутников Земли. *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*, 1: 25–32.
12. Войнов Г.Н. 2018. Новые сведения о приливах в Финском заливе Балтийского моря. *Ученые записки РГГМУ*, 53: 83–96. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36928472>
13. Ray R.D., Egbert G.D. 2017. Tides and satellite altimetry. In: Stammer D., Cazenave A. (eds) *Satellite altimetry over oceans and land surfaces.* CRC Press, p. 427–458. <https://doi.org/10.1201/9781315151779>

References

1. *Tablitsy prilivov. Vody aziatskoy chasti SSSR i prilegayushchikh zarubezhnykh rayonov* [Tide tables. Waters of the Asian part of the USSR and the surrounding foreign areas]. 1960. Leningrad: Gidrometeoizdat, 29 p. (In Russ.).
2. Deyeva R.A. 1970. *Uroven' Okhotskogo morya* [The level of the Sea of Okhotsk]. Moscow; Leningrad, 530 p. (Trudy GOIN; 15). (In Russ.).
3. Sudzuki K., Kanari S. 1986. Tides in the Sea of Okhotsk. *Marine Science*, 18(7): 445–463.
4. Kowalik Z., Polyakov I. 1998. Tides in the Sea of Okhotsk. *Physical Oceanography*, 28(7): 1389–1409. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1998\)028<1389:titsoo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<1389:titsoo>2.0.co;2)
5. Choi B.H., Kim. D.H., Fang Y. 1999. Tides in the East Asian seas from a fine-resolution Global Ocean tide model. *Marine Technology Society J.*, 33(1): 36–44. <https://doi.org/10.4031/mts.j.33.1.5>
6. Nekrasov A.V., Romanenkov D.A. 2003. [Prognostic assessment of the tidal level fluctuations in large-scale hydrotechnical construction on the coast of the White and Okhotsk seas]. In: *Kolebaniya urovnya v moryakh* [Sea level fluctuations]. Saint-Petersburg: RGGMU, p. 57–78. (In Russ.).
7. Shevchenko G.V., Romanov A.A. 2004. Tides characteristics in the Sea of Okhotsk definition from Topex/Poseidon sea level data. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 1: 49–62. (In Russ.).
8. Shevchenko G.V., Romanov A.A. 2008. Energetic characteristics of tidal and residual level oscillations in the Okhotsk Sea from satellite altimetry data. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 6: 67–76. (In Russ.).
9. Kovalev P.D., Rabinovich A.B., Kovbasyuk V.V. 1989. [Hydrophysical experiment at the southwestern shelf of Kamchatka (KAMSHEL-87)]. *Oceanology*, 29(5): 738–744. (In Russ.).
10. Kovalev P.D., Shevchenko G.V. 2008. [Experimental study of the long-wave processes at the Northwest Pacific shelf]. Vladivostok: Dal'nauka, 216 p. (In Russ.).
11. Gusev I.V., Lebedev S.A. 2013. [Consideration of the impact of ocean tides in the observation of geodetic artificial Earth satellites]. *Izv. vuzov. Geodeziya i aerofotos'yemka*, 1: 25–32. (In Russ.).
12. Voynov G.N. 2018. The new of data of tides in the Gulf of Finland in the Baltic Sea. *Uchenyye zapiski RGGMU*, 53: 83–96. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36928472>
13. Ray R.D., Egbert G.D. 2017. Tides and satellite altimetry. In: Stammer D., Cazenave A. (eds) *Satellite altimetry over oceans and land surfaces*. CRC Press, p. 427–458. <https://doi.org/10.1201/9781315151779>

Об авторов

Шевченко Георгий Владимирович (<https://orcid.org/0000-0003-0785-4618>), доктор физико-математических наук, зав. лабораторией океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО), ведущий научный сотрудник лаборатории цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, shevchenko_zhora@mail.ru

Цой Александр Тесуевич, старший специалист лаборатории океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО), Южно-Сахалинск

About the Authors

Shevchenko, Georgy V. (<https://orcid.org/0000-0003-0785-4618>), Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory of oceanography, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Leading Researcher of the Laboratory of tsunamis, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, shevchenko_zhora@mail.ru

Tsoi, Alexander T. Senior specialist of the Laboratory of oceanography, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk

Поступила в редакцию 12.07.2022
После рецензирования 16.08.2022
Принята к публикации 29.08.2022

Received 12 July 2022
Revised 16 August 2022
Accepted 29 August 2022

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



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

УДК 910.27+551.21+574.42

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.3.256-276>
<https://www.elibrary.ru/cxolys>

Крупномасштабное картографирование растительности Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающего ландшафта (о. Сахалин) по спутниковым данным

К. А. Швидская*, А. В. Копанина

*E-mail: kristina66689@mail.ru

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

Реферат. Методы дистанционного зондирования Земли в связи с их оперативностью и информативностью широко используются для изучения динамики растительности и мониторинга вулканической активности. Цель работы – изучение динамики грязевулканического ландшафта и растительного покрова Южно-Сахалинского грязевого вулкана, а также его окрестностей при помощи данных дистанционного зондирования Земли. Общая площадь исследуемой территории – 11.5 км². Работа выполнена в программе QGIS 3.16 с использованием космического снимка спутника Sentinel-2B, снимков из программы Google Earth и графических карт-схем исследуемой территории, разработанных О.А. Мельниковым и В.В. Ершовым. Создана обновленная крупномасштабная карта-схема Южно-Сахалинского грязевого вулкана с отображением всех известных полей извержений вулкана за последние 70 лет, современного и потухшего эруптивных центров. Проведена полуавтоматическая классификация космического снимка спутника Sentinel-2B методами контролируемой и неконтролируемой классификации при помощи модуля Semi-Automatic Classification Plugin. По результатам двух типов классификации посчитаны площади классов растительности исследуемой территории и созданы две карты растительного покрова Южно-Сахалинского грязевого вулкана в масштабе 1 : 50 000 по состоянию на 2018 г. Карты нуждаются в уточнении, но уже могут быть использованы для анализа динамики растительного покрова исследуемой территории. Неконтролируемую классификацию, на наш взгляд, целесообразнее применять до проведения полевого обследования интересующей территории, а контролируемую – после. Спутниковый мониторинг Южно-Сахалинского грязевого вулкана позволяет оперативно отслеживать его активность, оценивать рекреационную нагрузку и изучать влияние деятельности вулкана на растительность и ландшафт в целом.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, космические снимки, грязевой вулкан, извержение, полуавтоматическая классификация, динамика восстановления растительности, природный стресс, грязевулканический ландшафт

Large-scale mapping of the vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent landscape (Sakhalin Island) using satellite data

Kristina A. Shvidskaya*, Anna V. Kopanina

*E-mail: kristina66689@mail.ru

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

Abstract. The methods of remote sensing of the Earth, due to their efficiency and information content, are widely used to research vegetation dynamics and monitor volcanic activity. The purpose of this work is to research the dynamics of the mud volcanic landscapes and vegetation cover of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano, as well as its eruption, using Earth remote sensing data. The total area of the study area is 11.5 km². The work was done in QGIS 3.16 program using Sentinel-2B satellite image, images from Google Earth program and graphic maps of the study area created by O.A. Melnikov and V.V. Ershov. An updated large-scale schematic map of the Yuzhno-

Sakhalinsk mud volcano has been created, displaying all known volcanic eruption fields over the last 70 years, modern and extinct eruptive centers. A semi-automatic classification of the Sentinel-2B satellite image was carried out using the methods of supervised and unsupervised classification using the Semi-Automatic Classification Plugin module. Based on the results of two types of classification, the areas of vegetation classes of the study area were calculated and two maps of the vegetation cover of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano were created on a scale of 1 : 50 000 as of 2018. The maps need to be refined, but they can already be used to analyze the dynamics of the vegetation cover of the study area. In our opinion, it is more expedient to apply unsupervised classification before conducting a field survey of the area of interest, and supervised classification after. The practical significance of satellite monitoring of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano lies in the ability to quickly monitor its activity, assess the recreational load and study the impact of volcano activity on vegetation and the landscape as a whole.

Keywords: satellite monitoring, space imagery, mud volcano, eruption, semi-automatic classification, vegetation recovery dynamics, natural stress, mud volcano landscape

Для цитирования: Швидская К.А., Копанина А.В. Крупномасштабное картографирование растительности Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающего ландшафта (о. Сахалин) по спутниковым данным. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 3, с. 256–276. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.3.256-276>; <https://www.elibrary.ru/cxolys>

For citation: Shvidskaya K.A., Kopanina A.V. Large-scale mapping of the vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent landscape (Sakhalin Island) using satellite data. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 256–276. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.3.256-276>; <https://www.elibrary.ru/cxolys>

Благодарности и финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН. Авторы выражают благодарность и глубокую признательность сотрудникам отдела исследования вещественного состава геосфер Центра коллективного пользования Института морской геологии и геофизики ДВО РАН к.ф.-м.н. В.В. Ершову, О.А. Никитенко и к.т.н. А.А. Верхотурову, а также рецензентам за советы и ценные замечания при работе над данной статьей.

Acknowledgements and Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS. The authors express their thanks and deep appreciation to the staff of the Department for the study of material composition of the geospheres of Centre for the collective use, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS Cand. Sci. (Phys. and Math.) V.V. Ershov, O.A. Nikitenko and Cand. of Engineering A.A. Verkhoturorov as well as the Reviewers for advices and valuable comments during the work on this article.

Введение

Изучение динамики растительности и оценка биофизических параметров растительного покрова методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) представляет интерес для широкого круга научных и прикладных задач [1]. Анализ актуальных спутниковых снимков и данных многолетних полевых обследований растительности дает возможность оценивать изменения вулканических ландшафтов и скорости восстановления растительного покрова. Методы ДЗЗ применяются с целью мониторинга вулканической активности, изучения динамики восстановления растительности, вычисления нормализованного разностного индекса растительности (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), моделирования рельефа многих активных магматических вулканов – вулканов Курильских островов [2–4], Сент-Хеленс (США) [5], Олдоиньо-Ленгаи (Танзания) [6] и многих других, а также грязевых вулканов – Пугачевского и Южно-Сахалинского (о. Сахалин) [7–10], грязевых вулканов Керченского и Таманского п-овов [11, 12], о. Дашлы в Каспийском море [13], грязевых

вулканов северной Италии [14], Индонезии [15], грязевого вулкана Вилладжо Санта-Барбара (о. Сицилия, Италия) [16], Азяхтарма (Азербайджан) [17], Люси (Индонезия) [18, 19] и многих других.

Грязевой вулканизм по своему влиянию на ландшафт во многом близок к магматическому вулканизму, например по наличию бурных извержений, их периодичности, специфической форме рельефа, негативному воздействию извергающихся продуктов на окружающую среду. Однако извержения грязевых вулканов менее масштабны, представляя, как правило, меньшую опасность для окружающей среды. Тем не менее они являются опасными природными объектами, последствия таких извержений могут носить катастрофический характер [20–22]. Картографирование территории и растительности грязевого вулкана необходимо для оценки многолетней динамики его деятельности и поиска дополнительных индикаторов его активности по данным о растительности и растениях-ценозообразователях. На основании того, что высота грязевых вулканов не превышает 500 м, а иногда они вовсе не об-

разуют гор, а также в связи с локальностью характера извержений [20, 21], картографирование данных объектов, согласно российскому и зарубежному опыту, является преимущественно крупномасштабным [7, 8, 11, 12, 14–17].

Наш опыт использования ДЗЗ для крупномасштабного картографирования показал, что задача полуавтоматической классификации растительного покрова грязевого вулкана на территории площадью до 15 км² может быть решена [23].

Цель настоящей работы – изучение динамики грязевулканического ландшафта и растительного покрова Южно-Сахалинского грязевого вулкана (ЮСГВ), а также прилегающей территории общей площадью 11.5 км² по данным ДЗЗ.

Открытых данных о картографировании Южно-Сахалинского грязевого вулкана немного. Существующие карты и карты-схемы ЮСГВ содержат информацию о его геологическом строении [24], геоморфологии [9], расположении грифонов и групп грифонов [24, 25] и о характере растительности [24, 26]. Последние данные о характере растительности вулкана были представлены в научной работе К.А. Корзникова [10] по материалам полевых исследований, проведенных автором в 2013–2016 гг.

Необходимо было решить следующие задачи: внести изменения в ранее созданную карту-схему ЮСГВ [23] в масштабе 1 : 10 000; провести классификацию растительности ЮСГВ по спутниковым снимкам за 2018 г. посредством контролируемой и неконтролируемой классификации; проанализировать полученные результаты двух типов классификации и рассмотреть возможности их применения для крупномасштабного картографирования исследуемой территории; создать карты растительности ЮСГВ за 2018 г. в масштабе 1 : 50 000 по результатам проведенных двух типов классификации.

Материал и методы

Объект нашего исследования – Южно-Сахалинский грязевой вулкан – расположен в южной части Западно-Сахалинских гор, в предгорье Мицунского хребта, в между-

речье притоков р. Сусуя: рек Алат и Пута, в 18 км к северо-западу от г. Южно-Сахалинск (47°08'08" N, 142°57'66" E). Приблизительно в 5 км к северо-востоку от ЮСГВ расположен пос. Санаторный и примерно на таком же расстоянии к юго-востоку – садовые некоммерческие товарищества. ЮСГВ является памятником природы и обладает туристическим потенциалом* [26]. В то же время этот потенциально опасный природный объект [21, 27] оказывает существенное влияние на структуру ландшафта и инфраструктуру. По всей видимости, подпорные стенки, возведенные рядом со старой железной дорогой (Южно-Сахалинск – Холмск) со стороны вулкана еще в 30-е гг. XX в., защищали ее от возможных последствий его извержения [9].

Площадь ЮСГВ как особо охраняемой природной территории составляет 40 га (0.4 км²)*. По мнению авторов [9], грязевым вулканом является сдвоенный холм, в северо-восточной части которого располагается современный эруптивный центр. Мы считаем, что территория ЮСГВ значительно шире, она включает в себя современный эруптивный центр и прилегающие среднегорные лесные ландшафты, сформировавшиеся, как полагаем, под воздействием грязевого вулкана, общей площадью до 10–13 км². Площадь объекта нашего исследования составляет 11.5 км².

ЮСГВ представляет собой сдвоенный холм высотой чуть более 300 м над уровнем моря, вытянутый в меридиональном направлении [24]. По своей морфологии это усеченный конус диаметром более 400 м в основании, сложенный глинистыми отложениями (площадь выбросов свежей сопочной брекчии ≈ 5 га). На вершине холма имеются группы грифонов и сальз, из которых активно выделяются вода, газ и сопочный ил [28]. На пологих привершинных склонах холма фиксируются радиально расходящиеся эрозионные борозды и промоины глубиной 0.5–1.0 м. С увеличением крутизны склонов они углубляются и расширяются, сохраняясь даже под пологом леса. Обилие выпадающих осадков способствует их постепенному росту и формированию оврагов как на свежих грязевых потоках, так и на более древних (уже залесенных) полях сопочной брекчии

* Государственный кадастр особо охраняемых природных территорий регионального значения Сахалинской области. 2021. Южно-Сахалинск, с. 727–729 [State cadaster of specially protected natural areas of regional importance of the Sakhalin region. 2021. Yuzhno-Sakhalinsk, p. 727–729].

[9]. Извержения ЮСГВ происходят довольно часто. Сильные извержения вулкана зафиксированы в 1959, 1979 и 2001 гг., более слабые – между 1994 и 1996, в 2011 и 2020 гг. При извержении за небольшой промежуток времени вулканом выбрасываются большие объемы сопочной брекчии (порядка 10^3 – 10^5 м³) и подземных газов (преимущественно углекислый газ). В связи с этим грязевой вулканизм относится к опасным геологическим процессам, которые необходимо учитывать при развитии инфраструктуры, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. В грифонную стадию грязевой вулкан постоянно выделяет в относительно небольших количествах сопочную брекчию и газы из грифонов – эруптивных аппаратов. Общее число грифонов на вулкане остается практически неизменным из года в год – 40–70 [25]. Изменения температурного режима грифонов обусловлены главным образом вариациями скорости движения водогрязевой смеси в грифонных каналах [20].

Для вод ЮСГВ характерна высокая минерализация – в среднем 22.5 г/л. Значения pH находятся в диапазоне 7.0–9.2. ЮСГВ выносит на поверхность гидрокарбонатно-хлоридно-натриевые воды, богатые литием и бором. В составе газовых выбросов преобладает CO₂ (60–95 об.%) [28–31].

Растительность ЮСГВ находится под постоянным влиянием его деятельности и имеет сложную мозаичную структуру. Она представлена как луговой растительностью на первых стадиях сукцессии, так и лесной – разнообразными смешанными мелколиственно-темнохвойными сообществами [26, 32]. Отложения грязевого вулкана, особенно сравнительно свежие, на которых поселяются травянистые и древесные растения, характеризуются щелочностью с содовым засолением, что играет определяющую роль для жизни растений [32–34]. Грязевое поле зарастает постепенно в направлении от эруптивного центра, смена растительных группировок и сообществ происходит во времени аналогично зарастанию фумарольных полей магматических вулканов. Грязевые поля разных лет являются хорошей площадкой для изучения закономерностей сукцессионных процессов. Растительность проходит основные стадии первичной сукцессии, а также подвержена трансформации в резуль-

тате реактивации отдельных грифонов и сальз [32, 35, 36]. Высокая напряженность среды в ландшафте ЮСГВ вызывает адаптивные изменения базовых физиологических процессов растений, в особенности долгоживущих жизненных форм – деревьев и кустарников, что находит отражение в структурных перестройках в органах таких растений [32, 34, 37, 38].

Наша работа выполнена при помощи геоинформационной системы с открытым исходным кодом QuantumGIS 3.16 (QGIS) [39]. Изменения в ранее созданную карту-схему ЮСГВ [23] вносили с использованием крупномасштабной (1 : 1 000) картосхемы центральной (привершинной) части ЮСГВ после его извержения в декабре 2001 г. [24], карты-схемы ЮСГВ [25], топографической карты «Торомар (marshruty.ru)» из модуля QuickMapServices, данных совместных полевых исследований на ЮСГВ сотрудников лаборатории экологии растений и геоэкологии и отдела исследования вещественного состава геосфер ЦКП ИМГиГ ДВО РАН, а также анализа спутниковых снимков области исследования из программы Google Earth (за 2016, 2017 и 2021 гг.).

Для осуществления полуавтоматической классификации растительного покрова ЮСГВ (далее – классификация) был использован мультиспектральный снимок юго-восточной части о. Сахалин от 05.10.2018 г. спутника Sentinel-2В* и модуль Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). SCP – это плагин Python для программного обеспечения QGIS, разработанный с целью облегчения проведения мониторинга растительного покрова специалистами различных областей, в том числе с применением данных ДЗЗ [40].

Для дешифрирования и подборки каналов мультиспектрального снимка ЮСГВ мы использовали рекомендации Д.В. Курбатского [41] и информационную таблицу по интерпретации каналов [42], в которой приведено сопоставление каналов мультиспектральных снимков различных спутников (MODISMCD43A4, Landsat 8, Sentinel-2A).

Были применены два метода классификации спутникового снимка – контролируемая («с обучением») и неконтролируемая («без обучения»).

Контролируемая классификация заключается в отнесении каждого из пикселей снимка к

* *United States Geological Survey (USGS)*. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 05.09.2021).

определенному классу объектов, которому соответствует некоторая область в пространстве спектральных признаков. Данный тип классификации используется, когда есть возможность задать на снимке обучающую выборку. Обучающая выборка представляет собой совокупность участков-эталонов, принадлежность которых к определенному классу объектов установлена по данным натурных обследований, детальным снимкам или картам и которые

уверенно опознаются на снимке [43]. Обучающая выборка была основана на материалах левой карты, разработанной нами в 2018 г.

Неконтролируемая классификация (кластеризация) позволяет автоматически разделить все изображение снимка на участки с одинаковыми объектами на основе близких значений их спектральной яркости. При этом группы (кластеры), к которым отнесены все пиксели изображения, не обязательно соответствуют тематическим (информационным) классам. Критерием отнесения пикселей к тому или другому кластеру служит только схожесть спектральных характеристик [43]. В качестве алгоритма обработки изображения был выбран итеративный алгоритм ISODATA, используемый для более точной пошаговой кластеризации [44].

Результаты и обсуждение

Анализ данных полевого обследования 2020–2021 гг. после извержения ЮСГВ 2020 г. и снимков из программы Google Earth за разные годы (август 2016 и август 2021) представлен на карте-схеме ЮСГВ (рис. 1). На этой схеме обобщен графический материал об эруптивной деятельности ЮСГВ за последние 70 лет и представлены границы грязевых полей всех известных извержений разных лет (1959, 1966, 1979, 1996, 2001, 2011 и 2020 гг.). Сравнительный анализ космических снимков за разные годы, сведения об обследовании извержений ЮСГВ разных лет [20, 24, 25, 45], а также данные наших полевых исследований в 2020 и 2021 гг. позволяют сделать вывод о том, что извержение ЮСГВ в 2020 г. является сравнительно крупным, вероятно сопоставимым по объемам изверженной брекчии и влиянию на ландшафт с извержением 2001 г. Направление основного грязевого потока 2020 г., имеющего, по нашему мнению, оползневую природу, совпадает с направлением потока 2001 г. (рис. 1). Достигнув р. Алат, грязевой поток 2020 г., по состоянию с сентября 2020 по сентябрь 2021 г., «ушел» приблизительно на 90–100 м на север (по течению р. Алат) и на 300 м на юго-запад (против течения р. Алат).

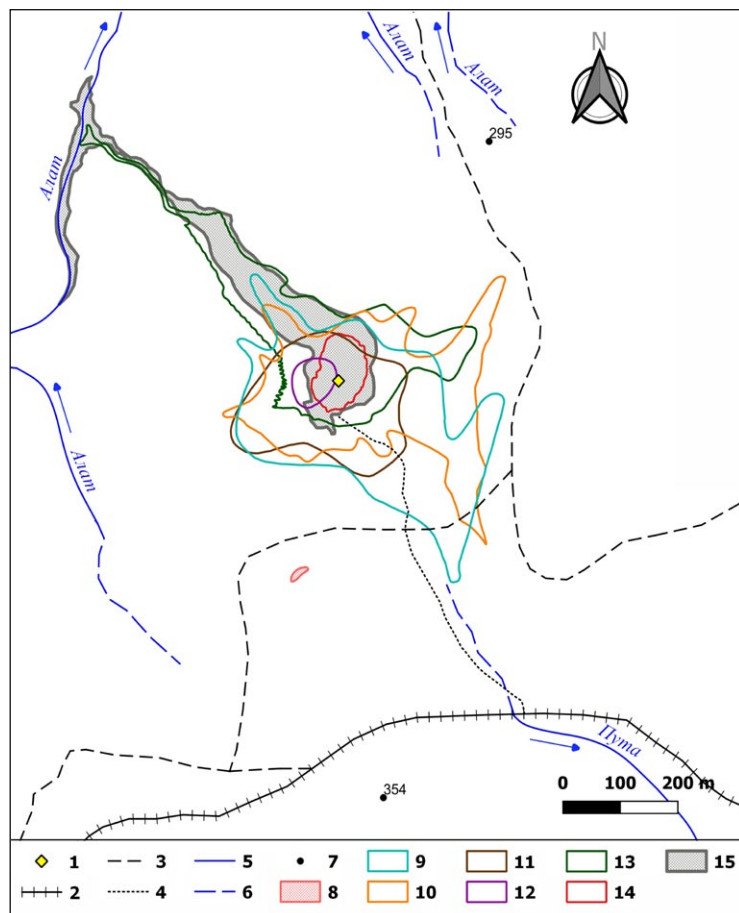


Рис. 1. Карта-схема извержений Южно-Сахалинского грязевого вулкана за последние 70 лет. 1 – современный эруптивный центр (данные полевого обследования В.В. Ершова); 2 – старая железная дорога (Южно-Сахалинск – Холмск); 3 – просека; 4 – тропа, ведущая от железной дороги к грязевому полю; 5 – реки; 6 – истоки рек; 7 – основные высоты (295 и 354 м); 8 – «старый вулкан» [45]; 9–15 – грязевые поля после извержений: 9 – 1959 г. [24], 10 – 1966 [24], 11 – 1979 [24], 12 – 1996 [24], 13 – 2001 [24], 14 – 2011 [25], 15 – 2020 г. Синие стрелки – направление течения рек.

Fig. 1. Schematic map of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano eruptions over the past 70 years. 1 – modern eruptive center (data from field survey by V.V. Ershov); 2 – old railroad (Yuzhno-Sakhalinsk – Kholmsk); 3 – clearing; 4 – trail leading from the railroad to the mud field; 5 – rivers; 6 – the sources of the rivers; 7 – major elevations (295 and 354 m); 8 – «old volcano» [45]; 9–15 – mud fields after eruptions: 9 – 1959 [24], 10 – 1966 [24], 11 – 1979 [24], 12 – 1996 [24], 13 – 2001 [24], 14 – 2011 [25], 15 – 2020. Blue arrows show the direction of river flow.

В мае 2020 г. в ходе полевого обследования последствий извержения мы обнаружили в русле р. Алат сформированную из брекчии объемную плотину, которая сместила русло и существенно сократила дебит реки. Это привело к формированию большой запруды вверх по течению р. Алат, способствовавшей перемещению изверженной и оползневой брекчии. Исходя из известных нам данных о предыдущих извержениях ЮСГВ, отображенных на сформированной нами карте-схеме (рис. 1), такое явление наблюдается впервые.

Полевое обследование центральной части ЮСГВ в конце мая 2020 г., вероятно спустя не более 2–3 мес. после извержения, показало, что вся луговая растительность с участием древесных растений, сформировавшаяся на отложениях 2001 г., была полностью уничтожена новым извержением вулкана. Часть луговых сообществ оказалась захороненной под изверженной брекчией, а остальная территория центра вулкана и потока 2001 г. с луговой и лесной растительностью была пройдена массивным оползнем.

Картографирование ЮСГВ по спутниковым снимкам позволило проследить динамику изменения грязевулканического ландшафта и его территории за последние 70 лет. Систематизированные данные об извержениях вулкана существенно упрощают этот процесс. На схеме (рис. 1) видно, что с 2001 г. грязевые поля стали приобретать другую форму. По мнению О.А. Мельникова [24], данное явление объясняется тем, что грязевой поток 2001 г. изменил свое направление, встретив сопротивление со стороны грязевых полей предыдущих лет, которые образовали широкие и пологие валы возвышений.

Оползневой грязевой поток извержения 2020 г. полностью уничтожил всю луговую растительность на потоке 2001 г. и существенно нарушил лесную растительность вдоль его границ, что отчетливо видно на космических снимках (рис. 2) и фотографиях (рис. 3), сделанных во время полевых исследо-

ваний в 2018 и 2021 гг. Кроме того, извержением 2020 г. была уничтожена растительность вдоль берегов р. Алат на расстоянии приблизительно 400 м (рис. 2). На снимках прослеживается динамика восстановления растительности вдоль северо-восточной границы нового грязевого поля 2020 г. Фрагментарно вокруг эруптивного центра и свежего грязевого поля сохранилась луговая растительность, представленная пионерным сообществом триостренника болотного (*Triglochin palustre* L.), появляющимся обычно спустя 2–3 года после извержения [32]. На фотографиях «языка» вулкана также представлен *Triglochin palustre*.

На рис. 4 изображены границы грязевого поля извержения 2020 г., современный эруптивный центр, группы активных грифонов и «старый вулкан», совмещенные со спутниковым снимком из программы Google Earth (август 2021 г.). Можно увидеть, что вокруг эруптивного центра растительность отсутствует. В местах скопления грифонов, располагающихся вдали от эруптивного центра, практически



Рис. 2. Снимки Южно-Сахалинского грязевого вулкана из программы Google Earth: верхний – август 2016, нижний – август 2021 г.

Fig. 2. Images of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano from Google Earth: upper – August 2016, lower – August 2021.



Рис. 3. Полевые обследования центральной части Южно-Сахалинского грязевого вулкана последних лет. Слева – зарастающий луговой растительностью с участием подроста древесных растений грязевой поток 2001 г. (осень 2018 г., фото А.И. Тальских), справа – оползневой поток извержения 2020 г. (лето 2021 г., фото К.А. Швидской) с фрагментами сохранившейся луговой растительности.

Fig. 3. Recent field surveys of the central part of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano. On the left is the mudflow of 2001 overgrown with meadow vegetation with the participation of undergrowth of woody plants (fall 2018, photo by A.I. Talskikh); on the right is the landslide flow of the 2020 eruption (summer 2021, photo by K.A. Shvidskaya) with fragments of preserved meadow vegetation.

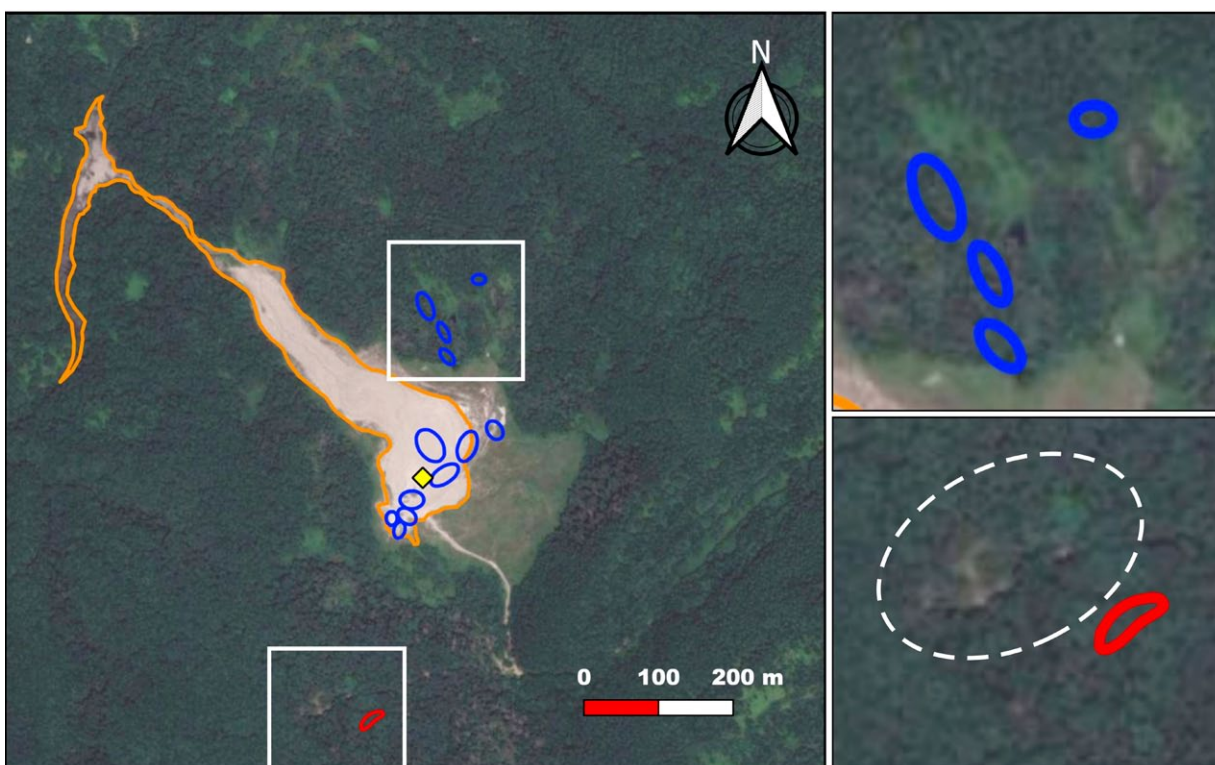


Рис. 4. Границы грязевого поля 2020 г. Южно-Сахалинского грязевого вулкана (оранжевый контур), современный эруптивный центр (желтый ромб) (данные полевого обследования В.В. Ершова), группы активных грифонов (синий контур) [25] и «старый вулкан» (красный контур) [45], совмещенные со снимком из программы Google Earth (август 2021 г.), привязанным в QGIS. В увеличении представлены: справа сверху – группы активных грифонов в лесу, внизу – «старый вулкан» с различающейся на снимке безлесной полосой (белая штриховая линия).

Fig. 4. The boundaries of the 2020 mud field of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano (orange outline), the modern eruptive center (yellow rhombus) (data from field survey by V.V. Ershov), active griffin groups (blue outline) [25] and the «old volcano» (red outline) [45], presented in the image from Google Earth (August 2021), referenced in QGIS. The magnification shows: top right – groups of active griffins in the forest; bottom right – the «old volcano» with a distinguishable in the image treeless strip (white dashed line).

отсутствует древесная растительность, что свидетельствует об их слабой, но постоянной активности. Грифоны и сальзы, действующие в лесу, оказывают угнетающее влияние на растительность (рис. 5). «Старый вулкан», описанный О.А. Мельниковым и Р.Н. Сабировым [45], упоминающийся в трудах Ф. Сайто [46], на снимке не просматривается. Однако хорошо различается безлесная заболоченная полоса – краевое понижение прежнего вулкана, располагающееся немного северо-западнее «старого» эруптивного центра. По данным проведенных ранее сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН полевых исследований [45], растительность, в том числе древесная, на «старом вулкане» моложе, чем за его границами. За последнее столетие эруптивный центр ЮСГВ сместился приблизительно на 330 м на северо-восток. Таким образом, при помощи космических снимков представляется возможным наметить районы проведения полевых исследований в будущем с целью поиска новых индикаторов активности вулкана.

По материалам полевого обследования территории ЮСГВ, проведенного в 2017–2018 гг., нами, с применением метода визуального дешифрирования спутникового снимка из программы Google Earth (май 2017 г.), была разработана полевая карта растительности ЮСГВ и прилегающей территории по состоянию на 2018 г. (полевая карта) в масштабе 1 : 30 000 (рис. 6).

На рис. 6 видно, что для территории ЮСГВ характерна мозаичность отдельных фитоценозов – неравномерность сложения его горизонтальной структуры. Мозаичность фитоценоза очень хорошо выражена в хвойно-мелколиственных лесах.

На грязевом поле извержения 2011 г. растительность практически отсутствует, встречаются лишь единичные растения *Triglochin palustre*. Чем дальше от грязевого поля, тем более сомкнуто располагаются группировки данного вида, в его дернинах поселяются зеленые мхи. Лишайников в пределах эруптивного центра не обнаружено [32]. К.А. Корзников [26] отмечает,



Рис. 5. Сальзы в северной части смешанного леса Южно-Сахалинского грязевого вулкана, обнаруженные во время полевых обследований 2016 г. Фото А.В. Копаниной.

Fig. 5. Salsas in the northern part of the mixed forest of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano, discovered during the field surveys in 2016. Photo by A.V. Kopanina.

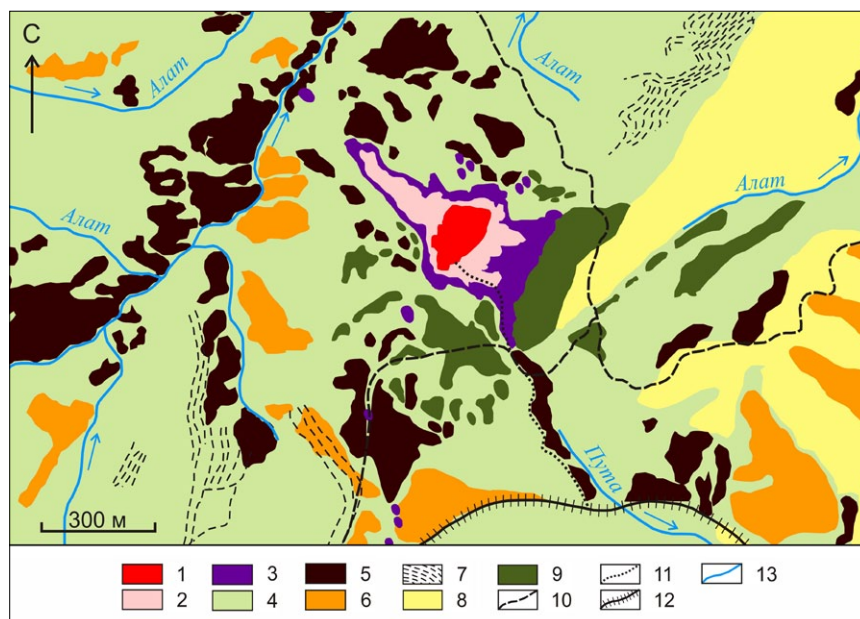


Рис 6. Полевая карта растительности Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающей территории по состоянию на 2018 г. 1 – грязевое поле после извержения 2011 г.; 2 – пионерное сообщество *Triglochin palustre*; 3 – сообщество *Phragmites australis* с участием разнотравья; 4 – смешанный мелколиственный лес; 5 – березово-ольховые высокотравные леса; 6 – березово-ольховые бамбучниковые и вейниково-высокотравные леса; 7 – лесопосадки *Larix cajanderi*; 8 – редколесье с *Sasa kurilensis*; 9 – пихтово-еловый лес; 10 – просека; 11 – тропа, ведущая от железной дороги к грязевому полю; 12 – старая железная дорога (Южно-Сахалинск – Холмск); 13 – реки с притоками. Голубые стрелки – направление течения рек.

Fig. 6. Field map of the vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent territory as of 2018. 1 – mud field after the 2011 eruption; 2 – pioneer community of *Triglochin palustre*; 3 – *Phragmites australis* community with forbs; 4 – mixed small-leaved forest; 5 – birch-alder tall grass forests; 6 – birch-alder bamboo and reed grass-high grass forests; 7 – forest plantations of *Larix cajanderi*; 8 – woodlands with *Sasa kurilensis*; 9 – fir-spruce forest; 10 – clearing; 11 – trail leading from the railroad to the mud field; 12 – old railroad (Yuzhno-Sakhalinsk – Kholmsk); 13 – rivers with tributaries. Blue arrows show the direction of river flow.

что, в отличие от первичных сукцессий, которые происходят на застывших лавах магматических вулканов, на грязевых полях ЮСГВ доминируют сосудистые растения.

На расстоянии 100–150 м от грязевого поля сообщество *Triglochin palustre* сменяется сообществом тростника обыкновенного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steud.) с участием разнотравного компонента: подорожник обыкновенный (*Plantago major* L.), мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.), осот полевой (*Sonchus arvensis* L.), анафалис жемчужный (*Anaphalis margaritacea* (L.) Benth. & Hook. F.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* (L.) Webb ex F.H. Wigg.), астра Глена (*Aster glehnii* F. Schmidt.), белокопытник японский (*Petasites amplus* Kitam.), бодяк камчатский (*Cirsium kamtschaticum* Lebed. ex DC) и др. В зоне контакта травянистых сообществ и леса по-

является подрост древесных растений, таких как береза каменная (*Betula ermanii* Cham.), береза плосколистная (*Betula platyphylla* Sukaczew), ива козья (*Salix caprea* L.), кустарник малина сахалинская (*Rubus sachalinensis* H. Lev.).

На удалении от грязевого поля в 180 м произрастает березово-ивово-ольховый лес с участием ели аянской (*Picea ajanensis* (Lindl. et Gord.) Fisch. ex Carr.), пихты сахалинской (*Abies sachalinensis* (F. Schmidt) Mast.) и лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr). Смешанный мелколиственный лес занимает обширные пространства, участки *Picea ajanensis* и *Abies sachalinensis* в лесах фрагментарное и единичное. Березово-ольховые высокотравные ассоциации включают одновидовые синузии высокотравья, представленные какалией мощной (*Cacalia robusta* Tolm.), таволгой камчатской (*Filipendula camtschatica* (Pall.) Maxim.), *Petasites amplus*, а также кустарниковые синузии бересклета сахалинского (*Euonymus sachalinensis* (F. Schmidt.)). В березово-ольховых бамбучниковых ассоциациях синузии бамбучника курильского (*Sasa kurilensis* (Rupr.) Makino & Shibata) чередуются с вейниково-высокотравными синузиями. На очень небольших участках произрастают пихтово-еловые сообщества.

В результате деятельности грифонов и сальз, располагающихся в лесу, погибают деревья, в первую очередь хвойные – ели и пихты, а позже лиственные – березы и рябины. Наиболее устойчивы к деятельности грязевулканических проявлений в лесу особи ольхи пушистой (*Alnus hirsuta* (Spach) Rupr.). Продолжительная и достаточно регулярная активность грифонов и сальз может привести к гибели сначала отдельных деревьев, а затем и целых лесных сообществ. Затем на изверженной брекчии начинается первичная сукцессия,

образуются травянистые сообщества (такие места обозначены на рис. 6 фиолетовым цветом за пределами «тела» грязевого вулкана), постепенно сменяющиеся мелколиственным, а затем пихтово-еловым лесом [32].

Для классификации растительного покрова ЮСГВ был выбран спутниковый снимок от 05.10.2018 г. (Sentinel-2B), выгруженный через модуль SCP с официального сайта Геологической службы США*. Выбор спутника Sentinel обоснован научно-практическим опытом А.П. Карпачева [49, 50], который провел классификацию спутниковых снимков Landsat и Sentinel-2A в QGIS при помощи модуля SCP с целью выявления участков усохшего и нарушенного леса на территории Национального парка «Орловское полесье» (Орловская обл., Россия). Параметры видимых каналов космических снимков у Landsat составляют 30 м, а у Sentinel-2A – 10 м. Таким образом, результаты классификации снимка Sentinel-2A, представленные А.П. Карпачевым, являются более четкими. Поэтому для исследуемой нами территории ЮСГВ, площадью 11.5 км², целесообразно использование снимков спутника Sentinel. Область исследования для проведения классификации была определена приблизительно в 3.3 × 3.5 км, с расположением грязевого поля ЮСГВ в центре.

При выборе комбинации каналов спутникового снимка от 05.10.2018 г. (Sentinel-2B) нами учитывался опыт применения комбинации «искусственные цвета» (8–4–3) (рис. 7 А), используемый при классификации различных типов растительности и широко освещенный в литературе [41, 51–55]. Также была выбрана комбинация «естественные цвета» (4–3–2) (рис. 7 Б). Выбор А.П. Карпачева [50] – комбинация каналов 4–6–12 (рис. 7 В) – нами не использовался по причине худшего, чем две первые комбинации, разрешения. Согласно таблице, приведенной В.Д. Долгополовым [42], отражающей области спектра, диапазоны и пространственное разрешение съемочных систем TERRA/AQUA, Landsat 8, Sentinel-2A, разрешение каналов B2, B3, B4 и B8 спутника Sentinel-2A составляет 10 м, а каналов B6 и B12 – 20 м.

В качестве основы обучающей выборки для проведения контролируемой классифика-

ции была использована полевая карта (рис. 6). В целях упрощения визуального дешифрирования снимка был выбран композит каналов 4–3–2 (рис. 7 Б). Осенний спутниковый снимок для классификации растительного покрова является наиболее актуальным, так как позволяет визуально отделить листовенные породы деревьев от темнохвойных и лиственницы. Также учитывались особенности рельефа исследуемой территории. На спутниковом снимке (рис. 7 Б) визуально видны повышения и понижения рельефа местности, заметны тени от гор и холмов. Многообразие вариаций лесных сообществ на исследуемой территории делает спутниковый снимок очень богатым в цветовом отношении.

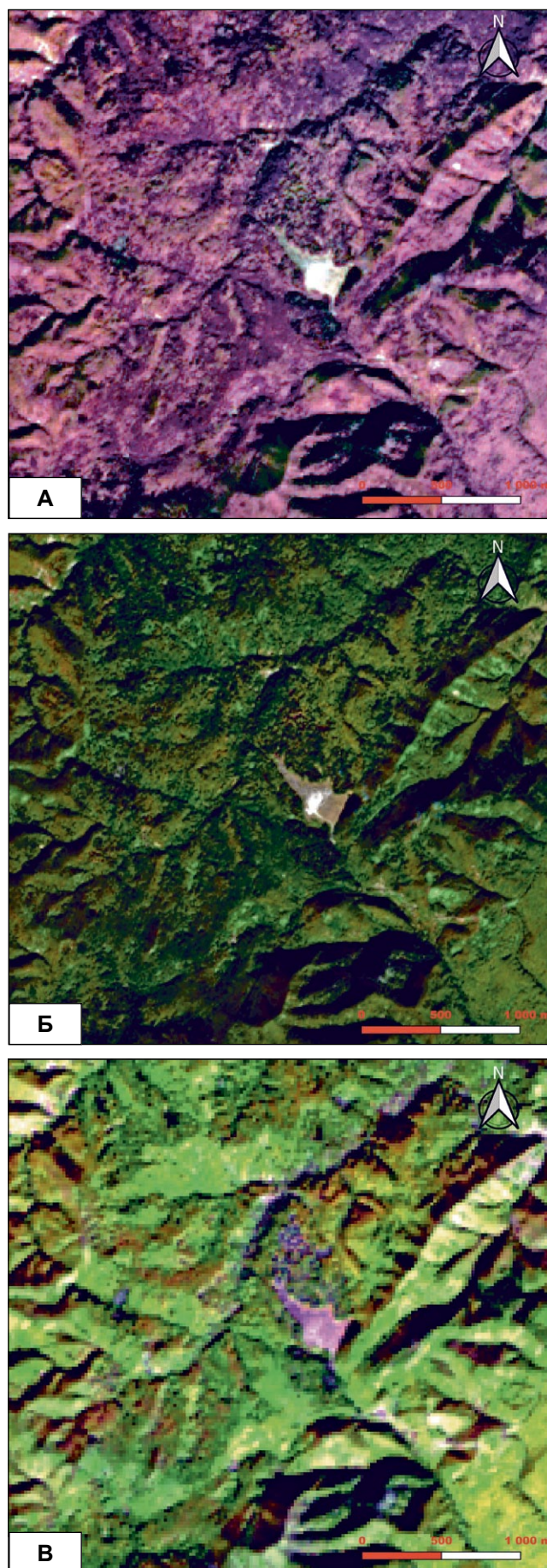
Так как алгоритмы с обучением используются, когда классов не очень много и они четко различаются на снимке [43], мы решили упростить классы растительности, которые определены на полевой карте. Это объясняется тем, что травянистые сообщества *Triglochin palustre* и *Phragmites australis* на спутниковом снимке имеют практически одинаковый цвет пикселей и для их классификации необходим снимок с более высоким разрешением, а разница между березово-ольховыми высокотравными лесами и березово-ольховыми бамбучниковыми и вейниково-высокотравными лесами на снимке не видна. Участки же с пихтово-еловым лесом, указанные на полевой карте, оказались покрыты тенью.

Таким образом, для проведения контролируемой классификации были определены 7 участков-эталонов (ROI – region of interest) (рис. 8):

- 1) отложения грязевулканической брекчии;
- 2) эродированные отложения грязевулканической брекчии, на которых произрастают травянистые сообщества;
- 3) смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Betula ermanii* и *Betula platyphylla*;
- 4) смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Abies sachalinensis* и *Larix cajanderi*;
- 5) редколесье с *Sasa kurilensis*;
- 6) редколесье с *Phragmites australis*;
- 7) пихтово-еловый лес.

Результат контролируемой классификации растительного покрова ЮСГВ, полученный при помощи SCP (рис. 9 А), частично совпа-

* United States Geological Survey (USGS). URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 05.09.2021).



дает с полевой картой. Три класса растительности, общие для полевой карты и результата контролируемой классификации (отложения грязевулканической брекчии, он же – грязевое поле после извержения 2011 г., редколесье с *Sasa kurilensis* и пихтово-еловый лес), на наш взгляд, классифицированы хорошо. «Тело» вулкана также практически полностью совпадает с полевой картой и снимком спутника Sentinel-2В (05.10.2018 г.) (рис. 9 Б). Вокруг «тела» грязевого вулкана четко обозначен переход травянистой растительности в редколесье с *Phragmites australis*. Красным контуром выделены места, классифицированные как эродированные отложения грязевулканической брекчии, на которых произрастают травянистые сообщества (рис. 9 А, Б). На снимке цвет пикселей таких участков визуально практически не отличается от цвета пикселей «тела» вулкана. Согласно результату классификации данные участки окружены редколесьем с *Phragmites australis*. Мы можем предположить, что древесная растительность на этих участках отсутствует, происходит процесс первичной сукцессии. Одной из причин этого явления может быть грифонная деятельность ЮСГВ, однако не исключены и оползневые процессы. Необходимо изучение данного вопроса в полевых условиях.

Также дополнительного уточнения требуют участки, покрытые тенью. Затененные участки в нашем случае классифицировались как смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Betula ermanii* и *Betula platyphylla*, смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Abies sachalinensis* и *Larix cajanderi* и пихтово-еловый лес. Это произошло по причине того, что темные пиксели попали в обучающую выборку участков-эталонов под номерами 3, 4 и 7. На наш взгляд, классификация растительного покрова затененных территорий, при отсутствии снимка с другого ракурса, возможна только путем проведения полевых исследований. В целом такой результат на данном этапе работы мы считаем приемлемым.

Рис. 7. Снимок Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающей территории со спутника Sentinel-2В (05.10.2018 г.) в композитах каналов 8–4–3 (А), 4–3–2 (Б) и 4–6–12 (В) [50].

Fig. 7. Image of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent territory from the Sentinel-2В satellite (October 5, 2018) in composites of channels 8–4–3 (А), 4–3–2 (Б) and 4–6–12 (В) [50].

Рис. 8. Процесс проведения обучающей выборки в SCP (контролируемая классификация), представленный на спутниковом снимке Sentinel-2B (05.10.2018 г.) в композите каналов 4–3–2. Участки-эталоны (ROI) см. в тексте.

Fig. 8. The process of a training sampling in SCP (supervised classification), presented on the Sentinel-2B satellite image (October 5, 2018) in the composite of channels 4–3–2. Reference-sites (ROI) see in the text.

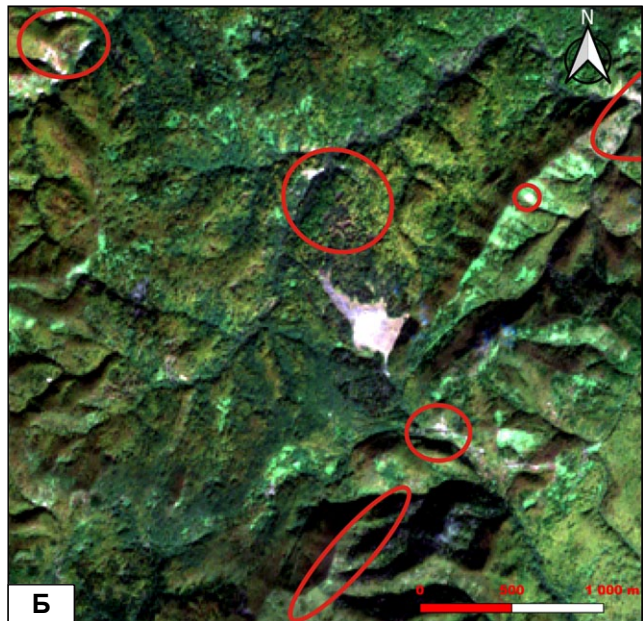
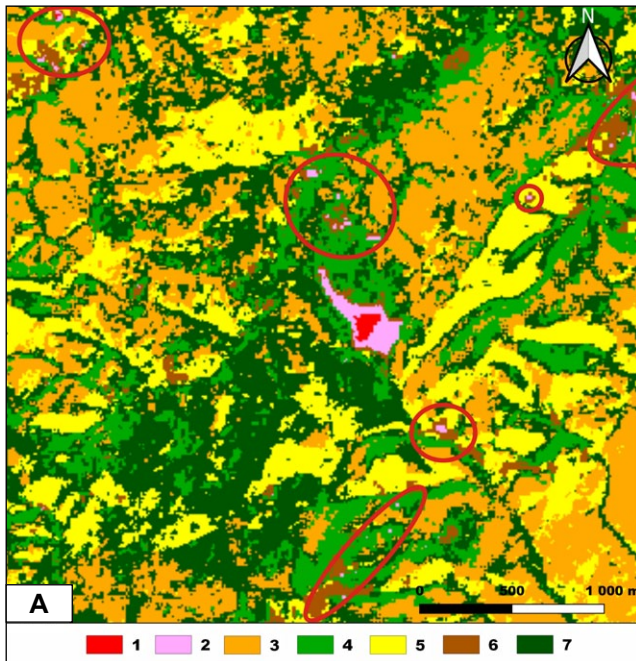
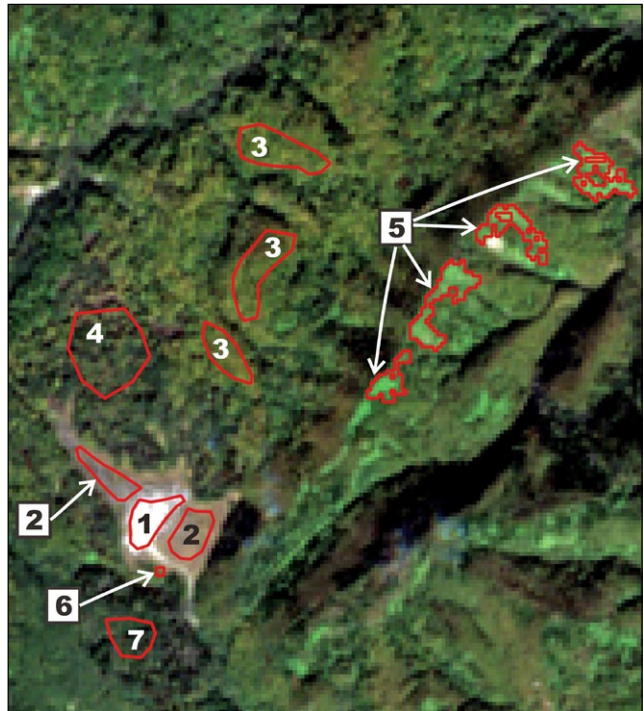


Рис. 9. Сравнение результата контролируемой классификации растительного покрова Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающей территории, полученного при помощи SCP (А), и мультиспектрального снимка спутника Sentinel-2B (05.10.2018 г.) (Б). 1 – отложения грязевулканической брекчии; 2 – эродированные отложения грязевулканической брекчии, на которых произрастают травянистые сообщества; 3 – смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Betula ermanii* и *Betula platyphylla*; 4 – смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Abies sachalinensis* и *Larix cajanderi*; 5 – редколесье с *Sasa kurilensis*; 6 – редколесье с *Phragmites australis*; 7 – пихтово-еловый лес. Красным контуром обозначены места, на которых, предположительно, отсутствует древесная растительность.

Fig. 9. Comparison of the result of supervised classification of the vegetation cover of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent territory obtained using SCP (A) and the multispectral image from the Sentinel-2B satellite (October 5, 2018) (B). 1 – deposits of mud volcanic breccia; 2 – eroded deposits of mud volcanic breccia, on which herbaceous communities grow; 3 – mixed small-leaved forest with a predominance of *Betula ermanii* and *Betula platyphylla*; 4 – mixed small-leaved forest with a predominance of *Abies sachalinensis* and *Larix cajanderi*; 5 – woodlands with *Sasa kurilensis*; 6 – woodlands with *Phragmites australis*; 7 – fir-spruce forest. The red outline indicates places where there is presumably no tree vegetation.

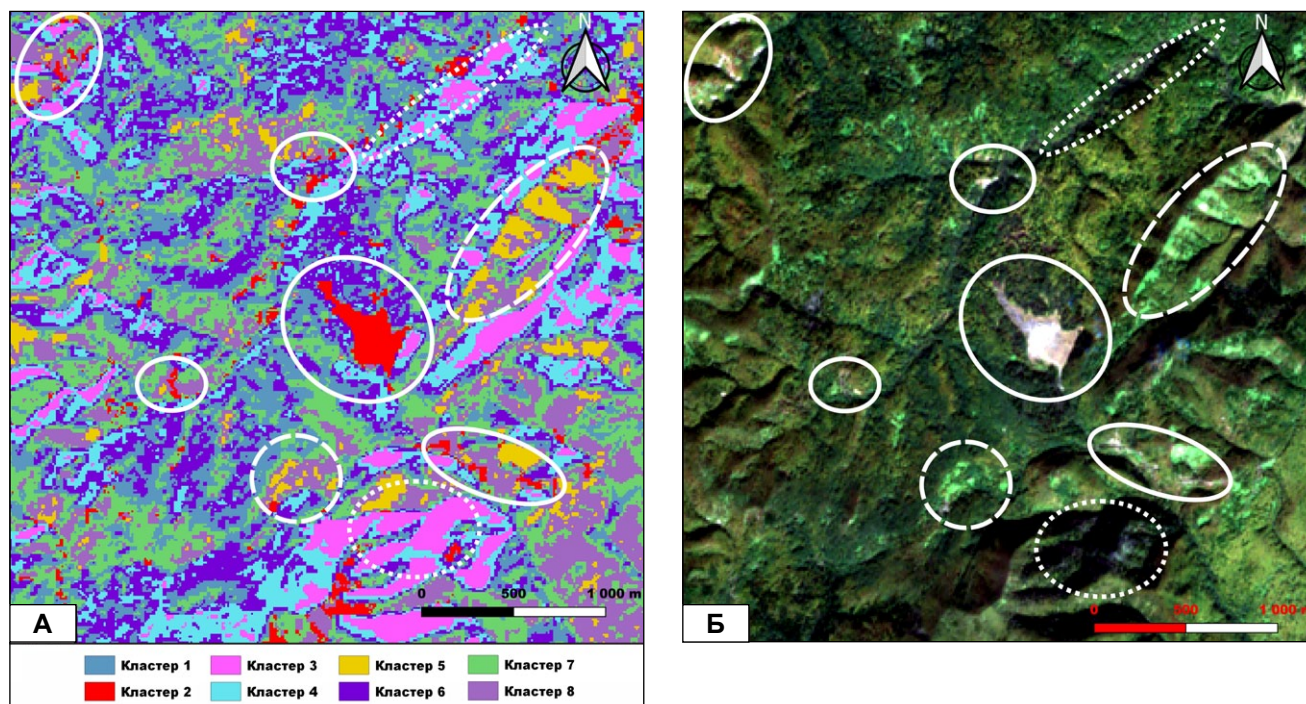


Рис. 10. Сравнение результата кластеризации растительного покрова Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающей территории, полученного при помощи SCP (А), и мультиспектрального снимка спутника Sentinel-2В (05.10.2018 г.) (Б). Белым сплошным контуром обозначены места, на которых, предположительно, отсутствует древесная растительность, белым длинным штрихом – синузии *Sasa kurilensis*, произрастающие на открытых участках, пунктиром – затененные участки.

Fig. 10. Comparison of the result of clustering of the vegetation cover of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent territory obtained using SCP (A) and the multispectral image from the Sentinel-2B satellite (October 5, 2018) (Б). The white solid outline indicates places where there is presumably no tree vegetation, the white dashed outline – *Sasa kurilensis* synusia growing in open areas, and the white dotted outline – shaded areas.

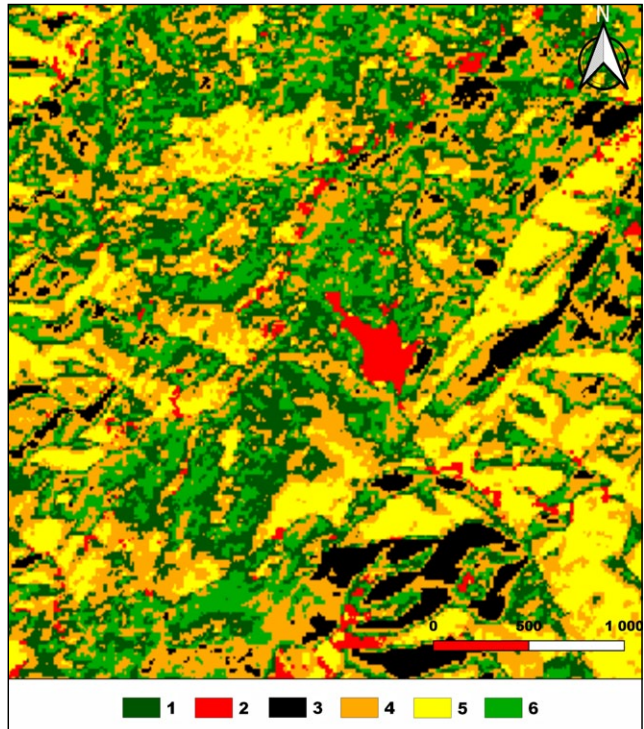
Неконтролируемую классификацию проводили с помощью алгоритма ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm), применяемого для более точной, многошаговой кластеризации. Алгоритм ISODATA использует минимальное спектральное расстояние для определения соответствующего кластера для каждого пиксела. Процесс начинается с назначения случайного (приближенного) среднего значения кластера и повторяется до тех пор, пока это значение не достигнет средней для каждого кластера величины исходных данных. Начальные средние значения кластеров распределяются равномерно вдоль центрального вектора спектрального пространства [44, 56]. Количество кластеров и число проведения итераций в SCP возможно выбирать самостоятельно. Мы выбрали 8 кластеров в связи с тем, что растительность ЮСГВ условно была поделена нами на 7 классов и плюс 1 кластер на затененные участки. Число итераций было определено в 10.

Результат проведения кластеризации спутникового снимка (рис. 10 А) частично совпадает с результатом контролируемой классификации (рис. 9 А), но классы растительности, определенные нами ранее, классифицированы не в полном объеме. Сравнивая полученные результаты двух типов классификации друг с другом, видим, что отложения грязевулканической брекчии, эродированные отложения грязевулканической брекчии, на которых произрастают травянистые сообщества, и редколесье с *Phragmites australis* SCP распознал как объекты одного типа (кластер 2). При увеличении количества кластеров мы вряд ли добились бы распознавания указанных сообществ в том же виде, как по результатам контролируемой классификации, потому что формирование кластеров происходит автоматически и мы получили бы слишком пестрое, нечитаемое изображение [56].

Сравнивая результат кластеризации со спутниковым снимком (рис. 10 Б), можно сказать, что в кластер 2 попали самые светлые

Рис. 11. Результат неконтролируемой классификации растительного покрова Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающей территории, полученный при помощи SCP. 1 – пихтово-еловый лес; 2 – отложения грязевулканической брекчии; 3 – затененные участки; 4 – смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Betula ermanii* и *Betula platyphylla*; 5 – редколесье с *Sasa kurilensis*; 6 – смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Abies sachalinensis* и *Larix cajanderi*.

Fig. 11. Result of unsupervised classification of the vegetation cover of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent territory obtained using SCP. 1 – fir-spruce forest; 2 – deposits of mud volcanic breccia; 3 – shaded areas; 4 – mixed small-leaved forest with a predominance of *Betula ermanii* and *Betula platyphylla*; 5 – woodlands with *Sasa kurilensis*; 6 – mixed small-leaved forest with a predominance of *Abies sachalinensis* and *Larix cajanderi*.



пиксели – «тело» грязевого вулкана и участки в лесу, на которых предположительно отсутствует древесная растительность. Хорошо различимы затененные участки (кластер 3) и синузии *Sasa kurilensis*, произрастающие на открытых участках, также заметные на спутниковом снимке (кластер 5).

Из кластеров 1, 4, 6, 7 и 8 путем визуального дешифрирования спутникового снимка и анализа полевой карты и результата контролируемой классификации мы попытались выделить три оставшихся класса лесной растительности. В результате реклассификации в SCP были объединены кластеры 4 и 7, 5 и 8; цвета кластеров были изменены (рис. 11). В результате неконтролируемой классификации растительного покрова ЮСГВ и прилегающей территории было распознано 5 классов растительности (не считая затененные участки). Как уже отмечалось выше, «тело» грязевого вулкана и травянистые сообщества практически совпали по форме и местоположению с аналогичными участками по контролируемой классификации. Кроме того, на наш взгляд, хорошо классифицировано редколесье с *Sasa kurilensis*. Остальные сообщества по результатам двух типов классификации совпали частично.

Мы векторизовали результаты двух типов классификации и рассчитали примерную

площадь каждого класса растительности на исследуемой территории. Согласно двум полученным результатам, на ЮСГВ и прилегающей территории преобладающим сообществом является смешанный мелколиственный лес. По результату контролируемой классификации его площадь составляет $\approx 5.27 \text{ км}^2$ (46 %), по неконтролируемой – его площадь больше, приблизительно 6.01 км^2 (52 %). Пихтово-еловый лес, наоборот, большее пространство занимает по контролируемой классификации – примерно 3.72 км^2 (32 %), а по неконтролируемой $\approx 2.47 \text{ км}^2$ (22 %). Редколесье с участием *Sasa kurilensis* для двух типов классификации имеет практически одинаковые значения площади – приблизительно 2.11 км^2 (18 %) согласно контролируемой классификации и 2 км^2 (17 %) – по неконтролируемой. Хотелось бы отметить, что различия между площадями лесных сообществ, за исключением несомкнутых лесных фитоценозов, по результатам контролируемой и неконтролируемой классификации невелики: 78 и 74 % соответственно.

Результат неконтролируемой классификации содержит информацию о затененных участках, площадь которых $\approx 0.74 \text{ км}^2$ (6 %). Как отмечалось выше, такие участки по результату контролируемой классификации были распознаны SCP как лесные сообщества.

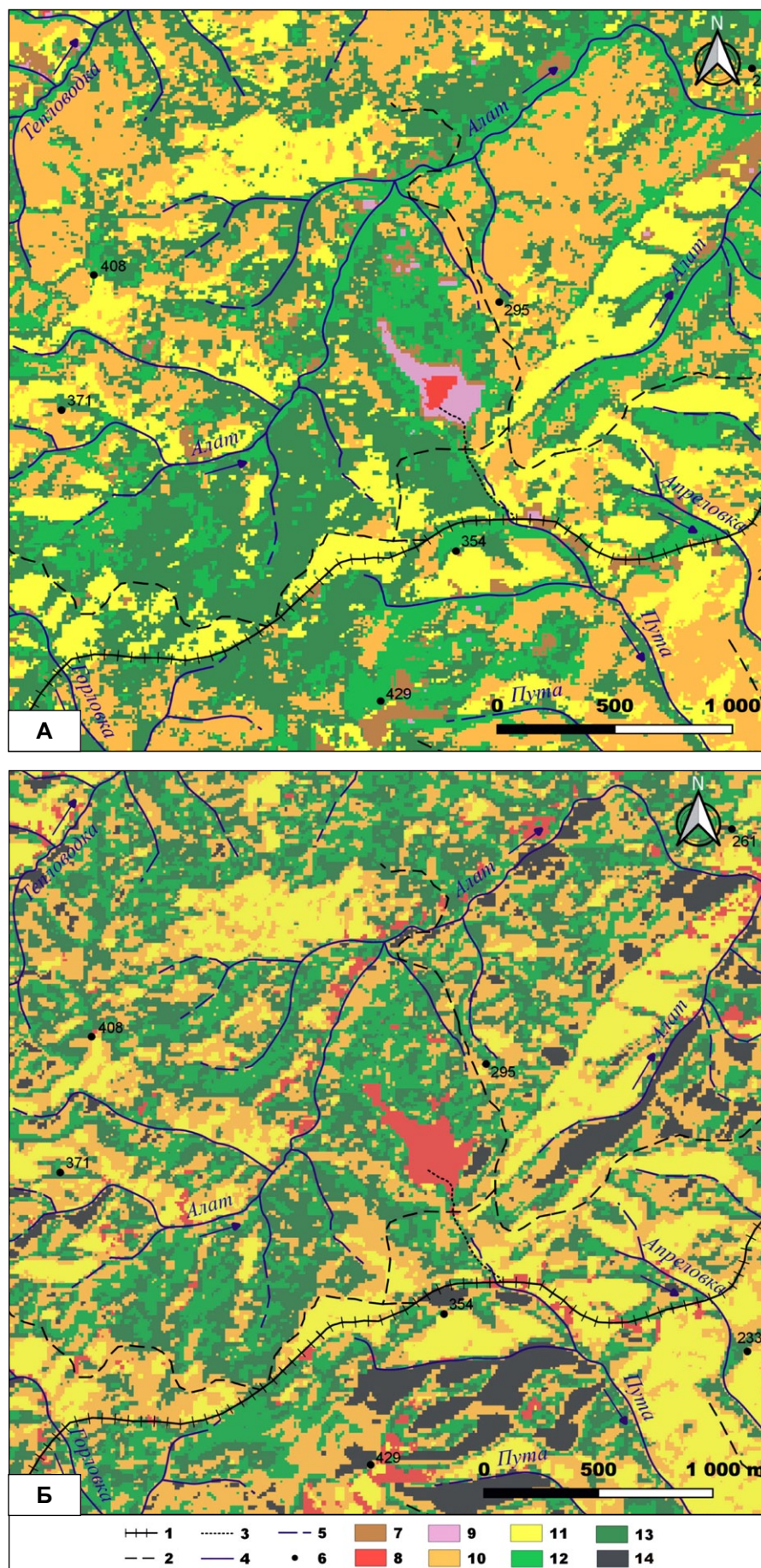


Рис. 12. Предварительные карты растительности Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающей территории, полученные в SCP в результате проведения контролируемой (А) и неконтролируемой (Б) классификации. 1 – старая железная дорога (Южно-Сахалинск – Холмск); 2 – просека; 3 – тропа, ведущая от железной дороги к грязевому полю; 4 – реки; 5 – истоки рек; 6 – основные высоты (261, 408, 295, 371, 354, 233 и 429 м); 7 – редколесье с *Phragmites australis*; 8 – отложения грязевулканической брекчии; 9 – эродированные отложения грязевулканической брекчии, на которых произрастают травянистые сообщества; 10 – смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Betula ermanii* и *Betula platyphylla*; 11 – редколесье с *Sasa kurilensis*; 12 – смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Abies sachalinensis* и *Larix cajanderi*; 13 – пихтово-еловый лес; 14 – затененные участки. Синие стрелки – направление течения рек.

Fig. 12. Preliminary maps of the vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and adjacent territory, obtained in SCP as a result of supervised (A) and unsupervised (B) classification. 1 – old railroad (Yuzhno-Sakhalinsk – Kholmsk); 2 – clearing; 3 – trail leading from the railroad to the mud field; 4 – rivers; 5 – the sources of the rivers; 6 – major elevations (261, 408, 295, 371, 354, 233 and 429 m); 7 – woodlands with *Phragmites australis*; 8 – deposits of mud volcanic breccia; 9 – eroded deposits of mud volcanic breccia, on which herbaceous communities grow; 10 – mixed small-leaved forest with a predominance of *Betula ermanii* and *Betula platyphylla*; 11 – woodlands with *Sasa kurilensis*; 12 – mixed small-leaved forest with a predominance of *Abies sachalinensis* and *Larix cajanderi*; 13 – fir-spruce forest; 14 – shaded areas. Blue arrows show the direction of river flow.

Остальные три класса растительности контролируемой классификации являются одним общим классом для неконтролируемой. Отложения грязевулканической брекчии и травянистые сообщества по контролируемой классификации занимают $\approx 0.09 \text{ км}^2$ (1 %), а редколесье с *Phragmites australis* $\approx 0.32 \text{ км}^2$ (3 %), по неконтролируемой $\approx 0.30 \text{ км}^2$ (3 %). В данном случае различия между площадями также несущественны.

На карты-схемы с результатами по обоим типам классификации растительного покрова ЮСГВ и прилегающей территории, полученные при помощи SCP, были нанесены топографические объекты: старая железная дорога (Южно-Сахалинск – Холмск), просека, тропа, ведущая от железной дороги к грязевому полю, реки (Тепловодка, Алат, Апрельовка, Пута, Горловка) с их истоками и притоками и основные точки высот. Полученные предварительные карты растительности ЮСГВ и прилегающей территории в масштабе 1 : 50 000 (рис. 12) нуждаются в полевом уточнении. Несмотря на то что площади классов растительности по двум классификациям практически совпадают, нельзя сказать то же самое о местоположении лесных сообществ. Однако в двух случаях просматривается четкое разделение редколесья и травянистых сообществ. В ходе натурных работ необходимо обследовать затененные участки и участки за пределами центра ЮСГВ, где, предположительно, отсутствует древесная растительность. Тем не менее мы считаем, что предварительные карты растительности ЮСГВ и прилегающей территории, полученные при помощи методов ДЗЗ (рис. 12), могут быть использованы для оценки динамики растительности и ландшафта в целом.

Таким образом, для целей крупномасштабного картографирования территорий общей площадью не более 10–13 км², отличающихся сложной мозаичной структурой фитоценоза и среднегорным типом рельефа, подходят оба метода полуавтоматической классификации, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Неконтролируемую классификацию, на наш взгляд, лучше проводить на первичном этапе работ, перед проведением полевых исследований. Кластеры, выделенные по спектральным характеристикам, да-

дут возможность приблизительно определить классы растительности, а также участки, требующие детального исследования полевыми методами. Контролируемую классификацию целесообразнее проводить после полевого обследования интересующей территории, когда имеется достаточно информации о растительности и существует возможность наиболее точно произвести обучающую выборку. Кроме того, возможна гибридная классификация, совмещающая лучшие результаты от контролируемой и неконтролируемой классификаций. Данный опыт может быть применен для создания карт растительности других грязевых вулканов и иных природных объектов, занимающих аналогичную площадь.

Заключение

В результате проведенной нами работы по разработке карты-схемы растительности Южно-Сахалинского грязевого вулкана с использованием методов визуального и автоматического дешифрирования космических снимков и натурных наблюдений нам удалось систематизировать и дополнить известные ранее данные об эруптивной деятельности вулкана и оценить ее влияние на ландшафтную обстановку. Границы последнего извержения ЮСГВ 2020 г. показывают, как существенно с течением времени меняется ландшафт центральной части вулкана.

По результатам полуавтоматической классификации растительного покрова ЮСГВ при помощи модуля SCP в QGIS мы установили, что методы контролируемой и неконтролируемой классификаций приемлемы для крупномасштабного картографирования и изучения динамики древесной растительности ландшафтов для территорий площадью не более 10–13 км², имеющих сложную структуру растительных сообществ. По результатам обоих типов классификации были рассчитаны площади каждого класса растительности на исследуемой территории. Оказалось, что эти площади по результатам двух классификаций близки. Созданы две предварительные карты растительности ЮСГВ и прилегающей территории по спутниковым данным, являющиеся промежуточным итогом работы, но позволяющие уже в настоящее время оценивать состояние растительности. Уточнения, которые необходимо провести для улучшения карт, –

это классификация участков травянистой растительности, участков без растительности и затененных участков. Мы считаем, что неконтролируемую классификацию целесообразнее применять до проведения полевого обследования интересующей территории, а контролируемую – после.

Спутниковый мониторинг активности ЮСГВ имеет важное прикладное значение, поскольку вулкан является опасным природным объектом и в то же время памятником природы, привлекательным для туристов. При помощи спутникового мониторинга можно оперативно отслеживать эруптивную деятельность ЮСГВ, оценивать ее влияние на растительность. Это позволит более детально подойти к анализу растительности как в эруптивном центре вулкана, так и в нескольких километрах от него, проследить сукцессионный процесс, а также определить точное место проведения полевых работ в перспективе. Кроме того, спутниковый мониторинг позволяет оценить рекреационную нагрузку на ЮСГВ.

Список литературы

1. Шабанов Н.В., Баргалева С.А., Ерошенко Ф.В., Плотников Д.Е. **2018**. Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 15(4): 166–178. <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178>
2. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В. **2018**. Мониторинг вулканической активности на Курильских островах: 15 лет деятельности группы SVERT. *Геосистемы переходных зон*, 2(3): 259–266. <http://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.259-266>
3. Верхотуров А.А. **2020**. Анализ изменения состояния экосистем на острове Атласова (Курильские острова). *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*, 25(3): 139–150. <http://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150>
4. Мелкий В.А., Верхотуров А.А., Братков В.В. **2021**. Оценка воздействия эксплозивных извержений вулкана Тятя (о. Кунашир, Курильские острова) на растительный покров по данным дистанционного зондирования Земли. *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*, 65(2): 184–193.
5. Teltscher K., Fassnacht F.E. **2018**. Using multispectral Landsat and Sentinel-2 satellite data to investigate vegetation change at Mount St. Helens since the great volcanic eruption in 1980. *J. of Mountain Science*, 15(9): 1851–1867. <http://doi.org/10.1007/s11629-018-4869-6>
6. Schutter A.D., Kervyn M., Canters F., Bosshard-Stadlin S.A., Songo M.A., Mattsson H.B. **2015**. Ash fall impact on vegetation: a remote sensing approach of the Oldoinyo Lengai 2007–08 eruption. *J. of Applied Volcanology*, 4(15): 1–18. <http://doi.org/10.1186/s13617-015-0032-z>
7. Мишурицкий Д.В., Ершов В.В., Жарков Р.В., Копанина А.В., Козлов Д.Н., Лебедева Е.В., Абдуллаева И.В., Власова И.И., Михалев Д.В. **2018**. Геолого-геоморфологические и ландшафтно-экологические особенности Пугачевского грязевого вулкана как основа для организации и информационного сопровождения туристического маршрута (остров Сахалин). *Геосистемы переходных зон*, 2(4): 398–408. <http://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.398-408>
8. Мишурицкий Д.В., Лебедева Е.В. **2020**. Геолого-геоморфологические особенности грязевого вулканизма о. Сахалин как основа познавательной рекреационной деятельности. В кн.: *Рельеф и природопользование: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием VIII Щукинские чтения, 28 сент. – 1 окт. 2020, Москва*. М.: МГУ, с. 453–460.
9. Лебедева Е.В., Мишурицкий Д.В. **2021**. Особенности строения и развития рельефа Южно-Сахалинского грязевого вулкана (о-в Сахалин). *Геоморфология*, 52(1): 75–85. <http://doi.org/10.31857/S0435428121010090>
10. Korznikov K.A. **2017**. Vegetation dynamics at two mud volcanoes of Sakhalin Island (Russia): comparison of chronosequences. *Botanica Pacifica*, 6(2): 13–20. <http://doi.org/10.17581/bp.2017.06203>
11. Иванов А.Ю., Матросова Е.Р., Кучейко А.Ю., Филимонова Н.А., Евтушенко Н.В., Терлеева Н.В., Либина Н.В. **2020**. Поиск и обнаружение естественных нефтепроявлений в морях России по данным космической радиолокационной съемки. *Исследование Земли из Космоса*, 5: 43–62. <http://doi.org/10.31857/S0205961420050061>
12. Skrypitsyna T.N., Florinsky I.V., Beloborodov D.E., Gaydalenok O.V. **2020**. Mud volcanism at the Taman Peninsula: multiscale analysis of remote sensing and morphometric data. *Remote Sensing*, 12(22): 3763. <http://doi.org/10.3390/rs12223763>
13. Лаврова О.Ю., Уваров И.А., Крашенинникова Ю.С. **2021**. Спутниковые наблюдения извержения грязевого вулкана на о. Дашлы в Каспийском море 4 июля 2021 г. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 18(3): 332–336. <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-332-336>
14. Santagata T. **2017**. Monitoring of the Nirano mud volcanoes Regional Natural Reserve (North Italy) using unmanned aerial vehicles and terrestrial laser scanning. *J. of Imaging*, 3(42). <http://doi.org/10.3390/jimaging3040042>
15. Beselly S.M., Wegen M., Grueters U., Reyns J., Dijkstra J., Roelvink D. **2021**. Eleven years of mangrove-mudflat dynamics on the mud-volcano-induced prograding delta in East Java, Indonesia: Integrating UAV and satellite imagery. *Remote Sensing*, 13(6): 1084. <http://doi.org/10.3390/rs13061084>
16. Brighenti F., Carnemolla F., Messina D., Guidi G.D. **2021**. UAV survey method to monitor and analyze geological hazards: the case study of the mud volcano of Villaggio Santa Barbara, Caltanissetta (Sicily). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21: 2881–2898. <http://doi.org/10.5194/nhess-21-2881-2021>
17. Lio K., Furuya M. **2018**. Surface deformation and source modeling of Ayaz-Akhtarma mud volcano, Azerbaijan, as detected by ALOS/ALOS-2 InSAR. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5: 61. <http://doi.org/10.1186/s40645-018-0220-7>
18. Agustawijaya D.S., Karyadi K., Krisnayanti B.D., Sutanto S. **2017**. Rare earth element contents of the Lusi mud: An attempt to identify the environmental origin of the hot mudflow in East Java – Indonesia. *Open Geosciences*, 9: 689–706. <http://doi.org/10.1515/geo-2017-0052>
19. Mazzini A., Svensen H., Akhmanov G.G., Aloisi G., Planke S., Malthé-Sørenssen A., Istadi B. **2007**. Triggering and dynamics evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia. *Earth and Planetary Science Letters*, 261: 375–388. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.001>

20. Мельников О.А., Ершов В.В. **2010**. Грязевой (газоводолитокластитовый) вулканизм острова Сахалин: история, результаты и перспективы исследования. *Вестник ДВО РАН*, 6: 87–93.
21. Ершов В.В. **2015**. Проблемы и методы геомониторинга и оценки опасности грязевулканической деятельности. В кн.: *Анализ, прогноз и управление рисками в современном мире: Материалы 9-й Междунар. науч.-практ. конф. «ГЕОРИСК-2015», 13–14 окт. 2015, Москва*. М.: РУДН, т. 2: 458–463.
22. Cyranoski D. **2007**. Indonesian eruption: muddy waters. *Nature*, 445: 812–815. <http://doi.org/10.1038/445812a>
23. Kopanina A.V., Shvidskaya K.A. **2021**. Possibility of using satellite-based monitoring for large-scale mapping and research of dynamics of mud volcanic landscapes. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 946: 012040. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012040>
24. Мельников О.А. **2002**. Южно-Сахалинский газоводолитокластитовый («грязевой») вулкан – уникальный объект Природы на Дальнем Востоке России: путеводитель экскурсии на вулкан для участников междунар. науч. симп. 24–28 сент. 2002, Южно-Сахалинск. Южно-Сахалинск: ИМГиГ СахНЦ ДВО РАН, 48 с.
25. Ершов В.В., Никитенко О.А. **2017**. Изотопный и химический состав вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана (по результатам опробования 2009 и 2010 годов). *Изв. высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион*, 4(1): 110–120. <http://doi.org/10.23683/0321-3005-2017-4-1-110-120>
26. Корзников К.А. **2014**. Растительные сообщества Южно-Сахалинского грязевого вулкана. *Вестник Томского государственного университета. Биология*, 1(25): 56–65.
27. Ustyugov G.V., Ershov V.V. **2021**. Mud volcanism as a dangerous phenomenon for oil and gas facilities. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 946: 012030. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012030>
28. Никитенко О.А., Ершов В.В. **2020**. Гидрогеохимическая характеристика проявлений грязевого вулканизма на острове Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 4(3): 321–335. <http://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.321-335.336-350>
29. Никитенко О.А., Ершов В.В., Перстнева Ю.А., Бондаренко Д.Д., Балогланов Э.Э., Аббасов О.Р. **2018**. Вещественный состав продуктов деятельности грязевых вулканов Сахалина и Азербайджана: сравнительный анализ. *Геосистемы переходных зон*, 2(4): 346–358. <http://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.346-358>
30. Никитенко О.А., Ершов В.В. **2021**. Возможности гидрогеохимической типизации флюидных систем. *Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 332(8): 109–125.
31. 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. <http://doi.org/10.3390/min11111186>
32. Kopanina A.V. **2019**. Vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano as an indicator of activity. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324: 012032. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012032>
33. Ершов В.В., Копанина А.В. **2017**. Химический состав водных вытяжек из почв грязевулканических ландшафтов. В кн.: *География: развитие науки и образования. Ч. I: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. LXX Герценовские чтения, посвящ. году экологии в России, 220-летию Герценовского ун-та, 85-летию факультета географии, 145-летию со дня рождения профессора Владимира Петровича Буданова, 20–23 апр. 2017, Санкт-Петербург*. СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, с. 142–147.
34. Kopanina A.V., Talskikh A.I., Vlasova I.I., Kotina E.L. **2022**. Age-related pattern in bark formation of *Betula ermanii* growing in volcanic environments from southern Sakhalin and Kuril Islands (Northeast Asia). *Trees*, 36(3): 915–939. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02257-x>
35. Копанина А.В., Лебедева Е.В., Власова И.И. **2018**. Особенности восстановления растительности после извержения 1907 г. кальдеры Ксудач на юге Камчатского полуострова. *Изв. РАН. Серия географическая*, 6: 57–69. <http://doi.org/10.1134/S2587556618060092>
36. Kopanina A.V., Lebedeva E.V., Vlasova I.I., Talskikh A.I. **2020**. Structural traits of woody plants and geomorphological conditions to the vegetation recovery at Ksudach caldera (Southern Kamchatka) since the explosive eruption in 1907. *J. of Mountain Science*, 17(7): 1613–1635. <http://doi.org/10.1007/s11629-019-5583-8>
37. Talskikh A.I., Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2019**. Structural features of the bark in young stems of *Betula ermanii* Cham. in the conditions of Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano (Sakhalin Island). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324: 012032. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012033>
38. Тальских А.И., Копанина А.В., Власова И.И. **2021**. Структурные особенности коры *Betula ermanii* (Betulaceae) в ландшафтах морских побережий и активных вулканов Дальнего Востока России. *Растительные ресурсы*, 57(2): 124–144. <http://doi.org/10.31857/S0033994621020096>
39. Rúa L., Bright P., Gall-Queguineur G. **2020**. *QGIS for census and survey mapping: training manual*. Oceania: Pacific Community (SPC), 91 p.
40. Congedo L. **2021**. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *The J. of Open Source Software*, 6(64): 3127. <http://doi.org/10.21105/joss.03172>
41. Курбатский Д.В. **2005**. Интерпретация комбинации каналов данных Landsat TM/ETM+. URL: <https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html> (дата обращения: 23.12.2021).
42. Долгополов Д.В. **2021**. Методика обнаружения водных объектов в зоне трубопроводов при паводках по данным космического мониторинга. *Мониторинг. Наука и технология*, 1(47): 75–83. <http://doi.org/10.25714/MNT.2021.47.009>
43. Малышева Н.В. **2018**. *Основы автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков лесов с использованием ГИС*: учеб. пособие. М.: МЭСХ, 136 с.
44. Лурье И.К., Косиков А.Г. **2003**. *Теория и практика цифровой обработки изображений*. М.: Научный мир, 168 с.
45. Мельников О.А., Сабиров Р.Н. **1999**. Новые данные о современном состоянии и былой активности Южно-Сахалинского газоводогрязевого вулкана (о. Сахалин). *Тихоокеанская геология*, 18(3): 37–46.
46. Сайто Ф. **1928**. [Грязевые вулканы близ железной дороги Тоёхара–Маока на Южном Сахалине]. *Тигаку Дзасси*, 40(477): 1–5 (На яп. яз.). Цит. по: Сайто Ф. Грязевые вулканы близ железной дороги «Тоёхара–Маока» на Южном Сахалине. Перевод с яп. З.И. Кургановой. Машинопись. Новоалександровск, СахКНИИ СО АН СССР, 1959 г. (Южно-Сахалинск, б-ка ИМГиГ ДВО РАН).
47. Шенников А.П. **1964**. *Введение в геоботанику*. Л.: ЛОЛГУ, 448 с.

48. Степановских А.С. **2017**. *Общая экология: учебник для вузов*. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 687 с.
49. Карпачев А.П. **2016**. *Опыт классификации космоснимка Landsat с помощью Semi-Automatic Classification Plugin в QGIS*. URL: https://gis-lab.info/qa/landsat_qgis_scp.html (дата обращения: 21.12.2021).
50. Карпачев А.П. **2017**. *Опыт классификации космоснимка Sentinel-2A с помощью Semi-Automatic Classification Plugin в QGIS*. URL: <https://gis-lab.info/qa/qgis-sacp-sentinel-2a.html> (дата обращения: 21.12.2021).
51. Комаров А.А., Суханов П.А., Кирсанов А.Д. **2018**. Тестовые мониторинговые полигоны как инструмент для идентификации данных дистанционного зондирования Земли. В кн.: *Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве: Материалы II Всерос. науч. конф. с междунар. участием, 26–28 сент. 2018, Санкт-Петербург*. СПб.: АФИ, с. 139–145. <http://doi.org/10.25695/agrophysica.2018.2.18778>
52. Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. **2020**. *Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учеб. пособие*. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifirovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf> (дата обращения: 15.12.2021).
53. Шихов А., Маракулин Я. **2012**. *Оценка последствий лесных пожаров в 2010 г. в Пермском крае*. URL: gis-lab.info/qa/fires-perm.html (дата обращения: 07.08.2021).
54. Мартынова М.В., Султанова Г.Р., Габделхаков А.К., Рахматуллин З.З., Одинцов Е.Е. **2020**. *Оценка зарастания сельскохозяйственных земель древесными породами по спутниковым данным Landsat на примере участка Бакалинского района Республики Башкортостан*. URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forests-ecosystems-in-a-changing-climate/> (дата обращения: 02.12.2021).
55. Чашин А.Н. **2018**. *Основы обработки спутниковых снимков в QGIS: учеб.-метод. пособие*. Пермь: ИПЦ «ПрокрестЪ», 47 с.
56. Зубков И.А., Скрипачев В.О. **2006**. Применение алгоритмов неконтролируемой классификации при обработке данных ДЗЗ. В кн.: *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов): материалы Четвертой Всерос. открытой ежегодной конф., 13–17 ноября 2006, Москва*. М.: ИКИ РАН, с. 57–62.
- SGUGiT = *Vestnik SSUGT*, 25(3): 139–150. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150>
4. Melkiy V.A., Verhoturov A.A., Bratkov V.V. **2021**. Assessment impact of Tyatya volcano explosive eruptions (Kunashir Island, Kuril Islands) on the vegetation cover basing on the Earth's remote sensing data. *Izv. vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 65(2): 184–193. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Teltcher K., Fassnacht F.E. **2018**. Using multispectral Landsat and Sentinel-2 satellite data to investigate vegetation change at Mount St. Helens since the great volcanic eruption in 1980. *J. of Mountain Science*, 15(9): 1851–1867. <http://doi.org/10.1007/s11629-018-4869-6>
6. Schutter A.D., Kervyn M., Canters F., Bosshard-Stadlin S.A., Songo M.A., Mattsson H.B. **2015**. Ash fall impact on vegetation: a remote sensing approach of the Oldoinyo Lengai 2007–08 eruption. *J. of Applied Volcanology*, 4(15): 1–18. <http://doi.org/10.1186/s13617-015-0032-z>
7. Mishurinskij D.V., Ershov V.V., Zharkov R.V., Kopani-na A.V., Kozlov D.N., Lebedeva E.V., Abdullaeva I.V., Vlasova I.I., Mikhalev D.V. **2018**. Geological-geomorphological and landscapes-ecological features of the Pugachev Mud Volcano as a basis for organization and information support of the tourist route (Sakhalin Island). *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 398–408. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.398-408>
8. Mishurinskij D.V., Lebedeva E.V. **2020**. [Geological and geomorphological features of mud volcanism on Sakhalin as a basis for cognitive recreational activities]. In: *[Relief and nature management: Proceedings of the All-Russian conference with international participation VIII Shchukin readings, 28 Sept. – 1 Oct. 2020, Moscow]*. Moscow: MSU, p. 453–460. (In Russ.).
9. Lebedeva E.V., Mishurinskii D.V. **2021**. Features of structure and development of the relief of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano (Sakhalin Is.). *Geomorfologia = Geomorphology*, 52(1): 75–85. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.31857/S0435428121010090>
10. Korznikov K.A. **2017**. Vegetation dynamics at two mud volcanoes of Sakhalin Island (Russia): comparison of chronosequences. *Botanica Pacifica*, 6 (2): 13–20. <http://doi.org/10.17581/bp.2017.06203>
11. Ivanov A.Yu., Matrosova E.R., Kucheiko A.Yu., Filimonova N.A., Evtushenko N.V., Terleeva N.V., Libina N.V. **2020**. Search and detection of natural oil seeps in the Russian seas using spaceborne SAR imagery. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 5: 43–62. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.31857/S0205961420050061>
12. Skrypitsyna T.N., Florinsky I.V., Beloborodov D.E., Gaydalenok O.V. **2020**. Mud volcanism at the Taman Peninsula: multiscale analysis of remote sensing and morphometric data. *Remote Sensing*, 12(22): 3763. <http://doi.org/10.3390/rs12223763>
13. Lavrova O.Yu., Uvarov I.A., Krashennnikova Yu.S. **2021**. Satellite observations of the eruption of a mud volcano on the Dashly Island in the Caspian Sea on July 4, 2021. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 18(3): 332–336. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-332-336>
14. Santagata T. **2017**. Monitoring of the Nirano mud volcanoes Regional Natural Reserve (North Italy) using unmanned aerial vehicles and terrestrial laser scanning. *J. of Imaging*, 3(42). <http://doi.org/10.3390/jimaging3040042>
15. Beselly S.M., Wegen M., Grueters U., Reyns J., Dijkstra J., Roelvink D. **2021**. Eleven years of mangrove-mudflat dy-

- namics on the mud-volcano-induced prograding delta in East Java, Indonesia: Integrating UAV and satellite imagery. *Remote Sensing*, 13(6): 1084. <http://doi.org/10.3390/rs13061084>
16. Brighenti F., Carnemolla F., Messina D., Guidi G.D. **2021**. UAV survey method to monitor and analyze geological hazards: the case study of the mud volcano of Villaggio Santa Barbara, Caltanissetta (Sicily). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21: 2881–2898. <http://doi.org/10.5194/nhess-21-2881-2021>
 17. Lio K., Furuya M. **2018**. Surface deformation and source modeling of Ayaz-Akhtarma mud volcano, Azerbaijan, as detected by ALOS/ALOS-2 InSAR. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5: 61. <http://doi.org/10.1186/s40645-018-0220-7>
 18. Agustawijaya D.S., Karyadi K., Krisnayanti B.D., Sutanto S. **2017**. Rare earth element contents of the Lusi mud: An attempt to identify the environmental origin of the hot mudflow in East Java – Indonesia. *Open Geosciences*, 9: 689–706. <http://doi.org/10.1515/geo-2017-0052>
 19. Mazzini A., Svensen H., Akhmanov G.G., Aloisi G., Planke S., Malthe-Sørenssen A., Istadi B. **2007**. Triggering and dynamics evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia. *Earth and Planetary Science Letters*, 261: 375–388. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.001>
 20. Mel'nikov O.A., Ershov V.V. **2010**. Mud (gas-water-lithoclastite) volcanism of the Sakhalin Island: history, results and prospects in research. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 6: 87–93. (In Russ., abstr. in Engl.)
 21. Ershov V.V. **2015**. Problems and methods for geomonitoring and hazard assessment of mud volcanic activity. In: *Analysis, prediction and management of natural risks in the modern world: Materials of the 9th International scientific and pract. conf. «GEORISK–2015», 13–14 October, 2015, Moscow*. Moscow: RUDN University, vol. 2: 458–463. (In Russ., abstr. in Engl.)
 22. Cyranoski D. **2007**. Indonesian eruption: muddy waters. *Nature*, 445: 812–815. <http://doi.org/10.1038/445812a>
 23. Kopanina A.V., Shvidskaya K.A. **2021**. Possibility of using satellite-based monitoring for large-scale mapping and research of dynamics of mud volcanic landscapes. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 946: 012040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012040>
 24. Mel'nikov O.A. **2002**. [Yuzhno-Sakhalinsk gas-water-lithoclastic (mud) volcano as a unique object of nature in the Russian Far East: a guidebook for excursions to the volcano for participants in the International scientific symposium, 24–28 Sept. 2002, Yuzhno-Sakhalinsk]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG SakhNC DVO RAN [IMGiG SakhSC FEB RAS], 48 p. (In Russ.)
 25. Ershov V.V., Nikitenko O.A. **2017**. Isotopic and chemical composition of waters of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano (sampling in 2009 and 2010). *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region*, 4(1): 110–120. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.23683/0321-3005-2017-4-1-110-120>
 26. Korznikov K.A. **2014**. Plant communities of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University J. of Biology*, 1(25): 56–65. (In Russ., abstr. in Engl.)
 27. Ustyugov G.V., Ershov V.V. **2021**. Mud volcanism as a dangerous phenomenon for oil and gas facilities. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 946: 012030. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012030>
 28. Nikitenko O.A., Ershov V.V. **2020**. Hydrogeochemical characteristics of mud volcanism manifestations on Sakhalin Island. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(3): 321–350. (In Russ. & Engl.). <http://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.321-335.336-350>
 29. Nikitenko O.A., Ershov V.V., Perstneva J.A., Bondarenko D.D., Baloglanov E.E., Abbasov O.R. **2018**. Substance composition produced by mud volcanoes of Sakhalin Island and Azerbaijan: the first comparison. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 346–358. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.346-358>
 30. Nikitenko O.A., Ershov V.V. **2021**. Possibility of hydrogeochemical classification of fluid systems. *Izv. Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov = Bull. of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 332(8): 109–125. (In Russ., abstr. in Engl.)
 31. 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. <http://doi.org/10.3390/min11111186>
 32. Kopanina A.V. **2019**. Vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano as an indicator of activity. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324: 012032. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012032>
 33. Ershov V.V., Kopanina A.V. **2017**. [The chemical composition of water extracts from the soils of mud volcanic landscapes]. In: *Geography: development of science and education. Pt. I: Materials of the annual International scientific and practical conference LXX Herzen readings, 20–23 April, 2017, St.-Petersburg*. St.-Petersburg: The Herzen University, p. 142–147. (In Russ.)
 34. Kopanina A.V., Talskikh A.I., Vlasova I.I., Kotina E.L. **2022**. Age-related pattern in bark formation of *Betula ermanii* growing in volcanic environments from southern Sakhalin and Kuril Islands (Northeast Asia). *Trees*, 36(3): 915–939. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02257-x>
 35. Kopanina A.V., Lebedeva E.V., Vlasova I.I. **2018**. Features of vegetation restoration after the eruption of 1907 Ksudach caldera in the south of the Kamchatka Peninsula. *Izv. Rossiiskoi akademii nauk. Seriya Geograficheskaya*, 6: 57–69. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.1134/S2587556618060092>
 36. Kopanina A.V., Lebedeva E.V., Vlasova I.I., Talskikh A.I. **2020**. Structural traits of woody plants and geomorphological conditions to the vegetation recovery at Ksudach caldera (Southern Kamchatka) since the explosive eruption in 1907. *J. of Mountain Science*, 17(7): 1613–1635. <http://doi.org/10.1007/s11629-019-5583-8>
 37. Talskikh A.I., Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2019**. Structural features of the bark in young stems of *Betula ermanii* Cham. in the conditions of Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano (Sakhalin Island). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324: 012032. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012033>
 38. Talskikh A.I., Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2021**. Structural features of *Betula ermanii* (Betulaceae) in coastal and active volcanic landscapes of the Russian Far East. *Rastitelnye Resursy*, 57(2): 124–144. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.31857/S0033994621020096>
 39. Rúa L., Bright P., Gall-Queguineur G. **2020**. *QGIS for census and survey mapping: training manual*. Oceania: Pacific Community (SPC), 91 p. (In Russ. & Engl.)
 40. Congedo L. **2021**. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *The J. of Open Source Software*, 6(64): 3127. <http://doi.org/10.21105/joss.03172>

41. Kurbatskiy D.V. **2005**. [Interpretation of Landsat TM/ETM+ data channel combination]. URL: <https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html> (accessed 23.12.2021). (In Russ.).
42. Dolgoplov D.V. **2021**. Methods for detecting water objects in the pipelines zone during floods based on space monitoring data. *Monitoring. Nauka i tehnologii = Monitoring. Science and Technologies*, 1(47): 75–83. (In Russ., abstr. in Engl.).
43. Malysheva N.V. **2018**. *Fundamentals of automated interpretation of aerospace images of forests using GIS: a tutorial*. Moscow: MESKH, 136 p. (In Russ.).
44. Lurie I.K., Kosikov A.G. **2003**. [Theory and practice of digital image processing]. Moscow: Nauchnyy mir [Scientific World], 168 p. (In Russ.).
45. Mel'nikov O.A., Sabirov R.N. **1999**. [New data on the current state and former activity of the Yuzhno-Sakhalinsk gas-water-mud volcano (Sakhalin Island)]. *Tikhookeanskaya geologiya = Geology of the Pacific Ocean*, 18(3): 37–46. (In Russ.).
46. Saito F. **1928**. [Mud volcanoes near the Toyohara-Maoka railway in South Sakhalin]. *Chigaku Zashi*, 40(477): 1–5 (In Japanese). Cited from: Saito F. [Mud volcanoes near the Toyohara-Maoka railway in South Sakhalin]. Transl. from Japanese by Z.I. Kurganova. Typescript. Novoaleksandrovsk, SakhKNII SB AS USSR, 1959. (Yuzhno-Sakhalinsk, Library of IMGG FEB RAS). (In Russ.).
47. Shennikov A.P. **1964**. [Introduction to geobotany]. Leningrad: LOLGU [Leningrad Order of Lenin State University], 448 p. (In Russ.).
48. Stepanovskikh A.S. **2017**. [General Ecology: Textbook for higher educational institutions]. Moscow: UNITY-DANA, 687 p. (In Russ.).
49. Karpachev A.P. **2016**. [Landsat satellite image classification experience using Semi-Automatic Classification Plugin in QGIS]. URL: https://gis-lab.info/qa/landsat_qgis_scp.html (accessed 21.12.2021). (In Russ.).
50. Karpachev A.P. **2017**. [Sentinel 2A satellite image classification experience using Semi-Automatic Classification Plugin in QGIS]. URL: <https://gis-lab.info/qa/qgis-sacp-sentinel2a.html> (accessed 21.12.2021). (In Russ.).
51. Komarov A.A., Sukhanov P.A., Kirsanov A.D. **2018**. Test monitoring polygons as a tool for the identification of remote sensing data. In: [The use of the Earth remote sensing in agriculture: materials of the All-Russian scientific conf. with international participation, 26–28 Sept. 2018, St.-Petersburg]. St.-Petersburg: Agrophysical Research Institute, p. 139–145. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.25695/agrophysica.2018.2.18778>
52. Shikhov A.N., Gerasimov A.P., Ponomarchuk A.I., Perminova E.S. **2020**. [Thematic interpretation and interpretation of space images of medium and high spatial resolution: textbook]. (In Russ.). URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>. (accessed 15.12.2021).
53. Shikhov A., Marakulin Ya. **2012**. [Assessment of the aftermath of forest fires in 2010 in the Perm Territory]. (In Russ.). URL: gis-lab.info/qa/fires-perm.html (accessed 07.08.2021).
54. Martynova M.V., Sultanova R.R., Gabdelkhakov A.K., Rakhmatullin Z.Z., Odintsov G.E. **2020**. [Estimation of overgrowth of agricultural lands by tree species according to Landsat satellite data on the example of the site of the Bakalinsky district of the Republic of Bashkortostan]. (In Russ.). URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forests-ecosystems-in-a-changing-climate/> (accessed 02.12.2021).
55. Chashchin A.N. **2018**. [QGIS satellite image processing basics: a tutorial]. Permian: IPC «Prokrost», 47 p. (In Russ.).
56. Zubkov I.A., Skripachiov V.O. **2006**. [Application of unsupervised classification algorithms in the processing of remote sensing data]. In: [Current problems in remote sensing of the Earth from space (physical foundations, methods and technologies for monitoring the environment, natural and anthropogenic objects): Proceedings of the All-Russian Open Annual Conference, 13–17 November 2006, Moscow]. Moscow: IKI RAN, p. 57–62. (In Russ.).

Об авторах

Швидская Кристина Александровна (<https://orcid.org/0000-0002-1380-3545>), ведущий специалист лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, kristina66689@mail.ru

Копанина Анна Владимировна (<https://orcid.org/0000-0001-5354-3584>), кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, anna_kopanina@mail.ru

About the Authors

Shvidskaya, Kristina A. (<https://orcid.org/0000-0002-1380-3545>), Leading Specialist, Laboratory of plant ecology and geoecology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, kristina66689@mail.ru

Kopanina, Anna V. (<https://orcid.org/0000-0001-5354-3584>), Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Head of the Laboratory of plant ecology and geoecology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, anna_kopanina@mail.ru

Поступила в редакцию 03.05.2022
После рецензирования 29.07.2022
Принята к публикации 05.08.2022

Received 3 May 2022
Revised 29 July 2022
Accepted 5 August 2022

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



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

УДК 577.118:543.421:592(265.53)

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ
<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.277-282>
<https://www.elibrary.ru/cjskze>

Содержание микроэлементов в некоторых видах беспозвоночных из залива Терпения Охотского моря

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

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

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

Реферат. Приведены данные атомно-абсорбционного определения содержания микроэлементов в тканях и органах некоторых видов беспозвоночных, отобранных в январе 2021 г. из прилова на промысле дальневосточной наваги *Eleginus gracilis* в водах зал. Терпения Охотского моря. Показано, что в промысловых видах концентрации токсичных нормируемых микроэлементов (As, Pb, Cd) не превышают допустимых уровней.

Ключевые слова: микроэлементы, атомная абсорбция, ткани и органы беспозвоночных, Охотское море

The content of trace elements in some invertebrate species from the Terpeniya Bay, the Sea of Okhotsk

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

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

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

Abstract. The data on atomic absorption determination of the content of trace elements in the tissues and organs of some invertebrate species sampled in January 2021 from the by-catch in the *Eleginus gracilis* fishery in the Terpeniya Bay, the Sea of Okhotsk are presented. The concentrations of toxic normalized trace elements (As, Pb, Cd) in commercial species are shown not to exceed the permissible levels.

Ключевые слова: trace elements, atomic absorption, invertebrate tissues and organs, Sea of Okhotsk

Для цитирования: Полтев Ю.Н., Коренева Т.Г., Марыжихин В.Е. Содержание микроэлементов в некоторых видах беспозвоночных в заливе Терпения Охотского моря. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 3, с. 277–282. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.277-282>; <https://www.elibrary.ru/cjskze>

For citation: Poltev Yu.N., Koreneva T.G., Maryzhikhin V.E. The content of trace elements in some invertebrate species from the Terpeniya Bay, the Sea of Okhotsk. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 277–282. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.277-282>; <https://www.elibrary.ru/cjskze>

Благодарности и финансирование

Исследования выполнены в рамках государственной программы СахНИРО на 2021 г. (тема № 076-00002-21-00). Авторы признательны сотрудникам сектора прибрежных и пресноводных рыб Сахалинского филиала ВНИРО (СахНИРО) за отбор беспозвоночных. Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания, способствующие улучшению данной публикации.

Acknowledgements and Funding

The research was carried out within the framework of the SakhNIRO state program for 2021 (subject No. 076-00002-21-00). Authors are grateful to the staff of the sector of coastal and freshwater fish of the Sakhalin Branch of VNIRO (SakhNIRO) for the sampling of invertebrates. Authors thank the reviewers for their constructive comments that help improve this publication.

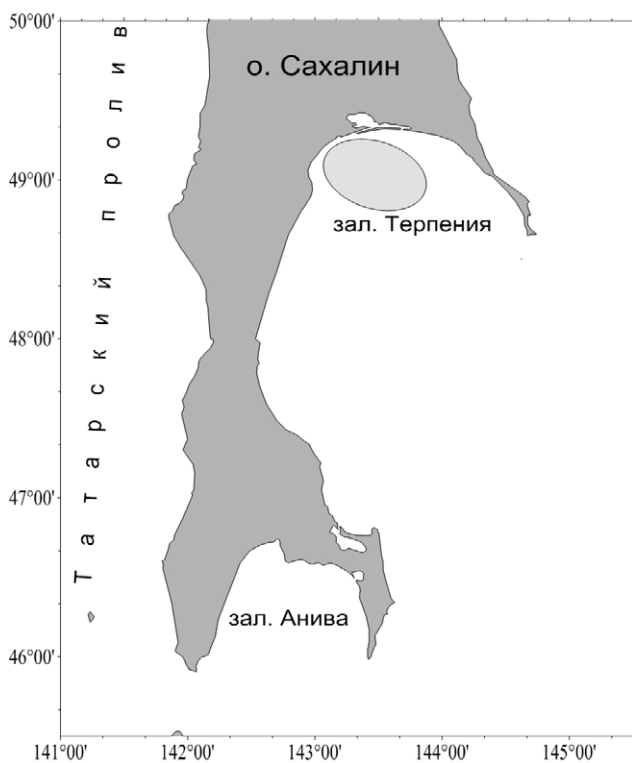
Введение

Сведения о содержании и распределении микроэлементов в органах и тканях гидроби-

онтов интересны для понимания роли микроэлементов в процессе жизнедеятельности организмов [1, 2; и др.]. В связи с усиливающейся

антропогенной нагрузкой оценка содержания и закономерностей аккумуляции микроэлементов в гидробионтах прибрежных морских экосистем становится особенно актуальной. Способность гидробионтов накапливать микроэлементы определяет необходимость контроля за уровнем содержания их токсичных представителей в тканях и органах промысловых видов. В настоящее время информация по содержанию микроэлементов в гидробионтах дальневосточных морей относится преимущественно к водам зал. Петра Великого Японского моря [3, 4, 5; и др.].

Залив Терпения (см. рисунок), расположенный в средней части восточного побережья о. Сахалин, является важным промысловым районом. Его воды богаты дальневосточной навагой *Eleginus gracilis*, желтоперой камбалой *Limanda aspera* и приморским гребешком *Mizuhopecten yessoensis*, а в его реках воспроизводится горбуша *Oncorhynchus gorbusha*. Из обитающих в заливе гидробионтов данные о содержании микроэлементов (Hg) получены лишь для горбуши [6]. Результаты наших исследований расширяют видовой список гидробионтов данного залива и перечень исследованных в них микроэлементов.



Район отбора беспозвоночных [7].
Invertebrate sampling area [7].

Цель данной работы – выявить уровни содержания и особенности распределения микроэлементов, в том числе нормируемых (свинец, кадмий, мышьяк), в некоторых видах водных биоресурсов из морских прибрежных вод зал. Терпения; дать санитарно-гигиеническую оценку качества промысловых видов в отношении содержания в них нормируемых токсичных элементов.

Материал и методика

Материалом для настоящего исследования служили образцы следующих тканей и органов беспозвоночных: икра волосатого краба *Pagurus brachiomastus* (Thallwitz, 1891); мышцы и экзоскелет клешни охотоморского рака-отшельника *P. ochotensis* (Brandt, 1851); мышцы и створки сердцевики гренландской *Serripes groenlandicus* (Mohr, 1786); гонады, щупальца и кожно-мышечный мешок кукумарии японской *Cucumaria japonica* (Semper, 1868); кожа и амбулакральные ножки морской звезды, схожей по внешнему виду с амурской *Asterias amurensis* (Lutken, 1871); тело пробковой губки *Suberites domuncula* var. *domuncula* (Olivi, 1792), обросшей раковину брюхоногого моллюска, используемого самкой волосатого краба в качестве убежища.

Гидробионты были отобраны по одному экземпляру из прилова на промысле дальневосточной наваги в центральной и западной частях зал. Терпения (см. рисунок) в конце января 2021 г. и до проведения исследований хранились в морозильной камере при температуре -20°C .

Для проведения анализа проб на содержание микроэлементов брали навески тканей и органов гидробионтов массой около 1 г. Пробоподготовку проводили способом «мокрой» минерализации в микроволновой печи Mars 6 фирмы SEM [8]. Концентрации свинца (Pb), кадмия (Cd), меди (Cu), хрома (Cr), марганца (Mn), никеля (Ni) и мышьяка (As) в полученном минерализате измеряли атомно-абсорбционным методом в режиме электротермической атомизации (GFAA) на спектрофотометре Shimadzu AA-6800 с графитовой печью и коррекцией фона на основе эффекта Зеемана. Концентрацию железа (Fe) определяли этим же методом в пламенном режиме с дейтериевой коррекцией фона (FLAA). Содержание микро-

элементов выражали в мг/кг сырой массы. Границы относительной суммарной погрешности измерений составляли 20 % для Fe, 25 % – для Pb и Cu, 26 % – для Cd, 32 % – для As и Mn, 34 % – для Cr, 36 % – для Ni [8].

Для градуировки спектрофотометра и контроля точности результатов измерений применяли стандартные образцы утвержденного типа – ГСО 7330-96 состава раствора ионов металлов (Fe, Cd, Mn, Cu, Ni и Pb), ГСО 7264-96 состава раствора ионов As(III), ГСО 7781-2000 состава раствора ионов Cr(VI).

Результаты и обсуждение

Исследованные беспозвоночные имели следующие размерно-весовые параметры: охотоморский рак-отшельник – длина от края клешней до конца брюшка 210 мм, ширина жесткого карапакса 24 мм, мягкого – 31 мм, масса тела 85.2 г; волосатый рак-отшельник – длина от края клешней до конца брюшка 110 мм, ширина жесткого карапакса 15 мм, мягкого – 19 мм, масса тела 19.9 г, масса икры на плеоподах 4.35 г; сердцевидка гренландская – длина створок 43 мм, ширина – 36 мм, высота – 24 мм, масса тела 44.0 г, масса мягких тканей 25.6 г, масса тела без створок 18.5 г; кукумария японская – длина 130 мм, ширина 70 мм, высота 32 мм.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о различных уровнях аккумуляции микроэлементов в органах и тканях беспозвоночных.

В тканях и органах десятиногих ракообразных повышенные содержания Fe, Cr, Pb и Cd характерны для икры волосатого рака-отшельника, а Cu и As – для мышц, Mn и Ni – для экзоскелета клешни охотоморского рака-отшельника (см. таблицу). Пониженные уровни аккумуляции большинства микроэлементов (Cd, Pb, Ni, Cr, Mn, Fe) отмечены в мышцах охотоморского рака-отшельника. В целом концентрация микроэлементов в тканях и органах ракообразных убывает в ряду от Fe и Cu к Cd или Pb. Различия концентраций отдельных микроэлементов в экзоскелете, мышцах и икре находятся в пределах одного порядка. Исключение составляет Cd, со-

держание которого в икре на порядок выше, чем в экзоскелете клешни и на 2 порядка – чем в мышцах клешни.

В мускуле двустворчатого моллюска сердцевидки гренландской, являющейся промысловым видом, отмечены более низкие (в 3–4 раза), чем в створках, концентрации Fe, Cu и Mn и в 2 раза более высокое содержание Pb. Содержание других элементов было сопоставимым. Концентрации нормируемых элементов Pb, As и Cd в мускуле не превышали допустимые уровни, составляющие 10, 5 и 2 мкг/г сырой массы соответственно*.

Способность моллюсков накапливать тяжелые металлы делает возможным их использование в качестве живых «мониторов» загрязнения окружающей водной среды [9]. Исходя из содержания нормируемых элементов в мускуле и створках сердцевидки гренландской, можно констатировать, что во всяком случае на участке ее обитания в центральной и западной частях залива водная среда не загрязнена токсикантами и благоприятна для обитания гидробионтов.

У представителя иглокожих кукумарии японской, также промыслового вида, повышенные уровни накопления Fe и Ni отмечены в щупальцах, а Mn и Cd – в гонадах. Наименьшее содержание практически всех элементов наблюдали в тканях кожно-мускульного мешка. Содержание нормируемых токсичных микроэлементов (As, Pb и Cd) в тканях и органах кукумарии не превышало их допустимый уровень.

В коже другого представителя иглокожих – морской звезды содержание Cu, Ni и Cd в 1.8–1.9 раз, а содержание Mn – в 13 раз выше, чем в амбулакральных ножках.

В тканях пробковой губки концентрации микроэлементов снижаются от Fe и Mn к Cr и Cd. Относительно других рассмотренных беспозвоночных данный вид характеризуется максимальными концентрациями Ni, Fe, As, Mn и Pb, что может указывать на возможность использования его в качестве биоиндикатора загрязнения водной среды этими микроэлементами. Ранее исследованиями в водах Хорватии было показано, что пробковая губка может служить биоиндикатором кадмиевой нагрузки [10].

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

Таблица. Концентрации микроэлементов в органах и тканях исследованных беспозвоночных
Table. Concentrations of trace elements in organs and tissues of the studied invertebrates

Вид	Ткани/ органы	Микроэлементы, мг/кг сыр. массы								в порядке убывания концентраций
		Fe	Cu	As	Mn	Cr	Ni	Pb	Cd	
Охотоморский рак- отшельник	Мышцы клешни	59.7	10.61	5.6	0.66	0.37	0.18	0.08	0.002	Fe Cu As Mn Cr Ni Pb Cd
	Экзоскелет клешни	72.5	6.90	3.5	5.27	0.61	0.63	0.15	0.019	Fe Cu Mn As Ni Cr Pb Cd
Волосатый рак-отшельник	Икра	107.2	9.23	0.9	1.60	0.74	0.39	0.18	0.243	Fe Cu Mn As Cr Ni Cd Pb
Сердцевидка гренландская	Мускул	54.7	0.68	0.6	1.37	0.41	0.67	0.08	0.002	Fe Mn Cu Ni As Cr Pb Cd
	Створки	175.1	2.82	0.9	4.93	0.55	0.77	0.04	0.002	Fe Mn Cu As Ni Cr Pb Cd
Кукумария японская	Кожно- мускульный мешок	24.2	0.38	0.6	0.78	0.32	0.18	0.09	0.016	Fe Mn As Cu Cr Ni Pb Cd
	Щупальца	77.7	0.60	0.7	1.14	0.40	0.37	0.09	0.047	Fe Mn As Cu Cr Ni Pb Cd
	Гонады	58.5	0.69	0.8	2.49	0.28	0.19	0.09	0.098	Fe Mn As Cu Cr Ni Cd Pb
Морская звезда	Кожа	159.8	2.30	0.9	9.15	0.49	0.66	0.16	0.160	Fe Mn Cu As Ni Cr Pb, Cd
	Амбулакраль- ные ножки	177.1	1.25	1.0	0.71	0.67	0.35	0.18	0.090	Fe Cu As Mn Cr Ni Pb Cd
Пробковая губка	Ткани	220.3	1.44	6.8	10.11	0.66	1.0	1.33	0.213	Fe Mn As Cu Pb Ni Cr Cd

Если сравнивать исследованные ткани и органы беспозвоночных, то наиболее высокое содержание Cu приходится на мышцы клешни охотоморского рака-отшельника, Cr и Cd – на икру волосатого рака-отшельника (см. таблицу). Минимальные значения Pb отмечены в створках сердцевидки гренландской, Mn – в мышцах клешни охотоморского рака-отшельника, Cd – в мышцах клешни охотоморского рака-отшельника, а также в мускуле и створках сердцевидки гренландской, Cr – в гонадах, а Ni, Fe и Cu – в кожно-мускульном мешке кукумарии японской, As – в кожно-мускульном мешке кукумарии японской и мускуле сердцевидки гренландской. Наименьшее содержание большинства исследованных микроэлементов у кукумарии японской согласуется с данными по голотурии *Eupentacta fraudatrix* из зал. Петра Великого, в тканях которой отмечен низкий уровень аккумуляции тяжелых металлов [11]. Наименьший диапазон различий в содержании (в 2.6 раза) наблюдается для Cr, наибольший (в 122 раза) – для Cd.

Исходя из полученных данных, содержание микроэлементов в органах и тканях различается в зависимости от вида и группы гидро-

бионтов. Так, в мышцах клешни охотоморского рака-отшельника (ракообразные) концентрации Cu на порядок, а As – в 9.3 раза выше, чем в мускуле сердцевидки гренландской (двустворчатые моллюски) (см. таблицу). На порядок выше относительно гонад кукумарии японской (иглокожие) и содержание Cu в икре волосатого рака-отшельника. В экзоскелете клешни охотоморского рака-отшельника содержание Cu на порядок выше, чем в кожно-мускульном мешке кукумарии японской, а в коже морской звезды (иглокожие) концентрации Cd в 80 выше, чем в створках сердцевидки гренландской. Различия в элементном составе у видов из различных семейств и отрядов отмечались ранее [12]. Одним из факторов, влияющих на концентрирование микроэлементов в органах животных, являются видовые особенности аккумуляции элементов [13]. В частности, более высокие концентрации Cu у ракообразных связаны с тем, что медь играет важную роль в процессах их тканевого дыхания, находясь в составе пигмента крови гемоцианина (аналога гемоглобина), переносящего кислород к органам в условиях пониженного содержания кислорода на участках обитания (бентос, придонный слой воды) [14].

Заключение

Определены массовые концентрации микроэлементов в некоторых беспозвоночных зал. Терпения (о. Сахалин), отобранных из прилова в период промысла дальневосточной наваги. Высокотоксичные для гидробионтов свинец и кадмий характеризуются низкими уровнями накопления в тканях и органах.

По содержанию токсичных нормируемых микроэлементов (As, Pb и Cd) промысловые виды (сердцевидка гренландская и кукумария японская) являются безопасными. Полученные данные косвенно указывают на благоприятную экологическую обстановку в центральной и западной частях зал. Терпения относительно содержания этих микроэлементов.

Авторы понимают, что делать выводы о содержании микроэлементов в тканях различных видов гидробионтов по единичным экземплярам малопродуктивно. Для этого необходимо исследовать некоторую выборку каждого вида. Но данное сообщение можно рассматривать как этап поискового исследования для оценки накопления микроэлементов организмами разных трофических уровней с целью выявления видовых особенностей этого накопления и учета этих особенностей в дальнейших исследованиях экологического направления.

Список литературы

- Ковкековдова Л.Т. 2008. Оценка качества отдельных видов промысловых гидробионтов Охотского моря по содержанию металлов и металлоидов. *Вестник Российской военно-медицинской академии*, 23(3): 106–117.
- Патин С.А., Морозов Н.П. 2003. *Микроэлементы в морских организмах и экосистемах*. М.: Пищ. пром-сть, 153 с.
- Христофорова Н.К., Шулькин В.М., Кавун В.Я., Чернова Е.Н. 1993. *Тяжелые металлы в промысловых и культивируемых моллюсках залива Петра Великого*. Владивосток: Дальнаука, 296 с.
- Кику Д.П., Ковкековдова Л.Т. 2007. Оценка содержания микроэлементов в устрицах гигантских (*Crassostrea gigas* из зал. Петра Великого (Японское море). *Известия ТИНРО*, 150: 400–407.
- Стеблевская Н.И., Полякова Н.В., Жадько Е.А., Чусовитина С.В. 2013. Микроэлементный состав тканей некоторых видов гидробионтов залива Петра Великого (бухта Северная). *Вестник ДВО РАН*, 5: 127–132.
- Ковальчук М.В., Христофорова Н.К., Литвиненко А.В., Цыганков В.Ю. 2018. Содержание ртути в горбуше *Oncorhynchus gorbusha* в заливе Терпения Охотского моря. В кн.: *Прибрежно-морская зона Дальнего Востока России: от освоения к устойчивому развитию: Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 20-летию Международной кафедры ЮНЕСКО «Морская экология» ДВФУ (Владивосток 8–10 ноября 2018 г.)*: сб. материалов. Владивосток: Изд-во ДВФУ, с. 54–56.

- Государственная геологическая карта Российской Федерации: масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). 2016. Серия Дальневосточная. Лист М-54 – Александровск-Сахалинский: Объяснительная записка. СПб.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ, 599 с.
- Методика количественного химического анализа. Определение As, Pb, Cd, Sn, Cr, Cu, Fe, Mn и Ni в пробах пищевых продуктов и пищевого сырья атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией № М-02-1009-08. 2009. Аттест. Всерос. НИИ метрологии им. Д.И. Менделеева. Свид-во № 242/43-09 от 08.07.2009. ООО «Внедренческая фирма «Аналитик»», 21 с.
- Зарыхта В.В., Zhang Z.H., Кузнецова Т.В., Озерский П.В., Feng Y.J. 2020. Дифференциальное накопление тяжелых металлов в мягких тканях трех видов двусторчатых моллюсков из реки Сунгари вблизи г. Харбина (Китай). *Журнал эволюционной биохимии и физиологии*, 56(2): 119–126.
- Müller W.E.G., Batel R., Lacorn M., Steinhart F.I., Simat T., Lauenroth S., Hassanein H., Schroder H.C. 1998. Accumulation of cadmium and zinc in the marine sponge *Suberites domuncula* and its potential consequences on single-strand breaks and on expression of heatshock protein: a natural field study. *Marine Ecology Progress Series*, 167: 127–135. <https://doi.org/10.3354/meps167127>
- Долматова Л.С., Слинько Е.Н., Колосова Л.Ф. 2010. Содержание тяжелых металлов в тканях голотурий *Eupentacta fraudatrix* в заливе Петра Великого. *Изв. Самарского научного центра Российской академии наук*, 12(5): 1287–1291.
- Виноградов А.П. 1944. *Химический элементарный состав организмов моря*: в 3 ч. Т. 4, ч. 3. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 273 с. (Тр. Биогеохим. лабор. АН СССР; т. 6).
- Покаржевский А.Д. 1993. *Геохимическая экология наземных и почвенных животных (биоиндикационные и радиоэкологические аспекты)*: дис. ... докт. биол. наук. Москва.
- Наревич И.С., Ковкековдова Л.Т. 2017. Микроэлементы (As, Cd, Pb, Fe, Cu, Zn, Se, Hg) в промысловых ракообразных Японского моря. *Известия ТИНРО*, 189: 147–155.

References

- Kovokovdova L.T. 2008. [Assessment of the quality of certain species of commercial hydrobionts of the Sea of Okhotsk by the content of metals and metalloids]. *Vestnik Rossiyskoy voyenno-meditsinskoy akademii*, 23(3): 106–117. (In Russ.).
- Patin S.A., Morozov N.P. 2003. *Mikroelementy v morskikh organizmakh i ekosistemakh* [Trace elements in marine organisms and ecosystems]. М.: Pishchevaya promyshlennost', 153 p. (In Russ.).
- Khristoforova N.K., Shul'kin V.M., Kavun V.Ya., Chernova E.N. 1993. [Heavy metals in commercial and cultivated mollusca in the Peter the Great Gulf]. Vladivostok: Dal'nauka, 296 p. (In Russ.).
- Kiku D.P., Kovokovdova L.T. 2007. [Assessment of trace element content in giant oysters (*Crassostrea gigas* from the Peter the Great Gulf (the Sea of Japan)]. *Izvestiya TINRO*, 150: 400–407. (In Russ.).
- Steblevskaya N.I., Polyakova N.V., Zhad'ko E.A., Chusovitina S.V. 2013. [Trace element composition of tissues of some species of hydrobionts in the Peter the Great Gulf (Severnaya Bay)]. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 5: 127–132. (In Russ.).
- Koval'chuk M.V., Khristoforova N.K., Litvinenko A.V., Tsygankov V.Yu. 2018. Mercury content in pink salmon *Oncorhynchus gorbusha* from Bay of Terpeniya Sea of Okhotsk. In:

- Coastal and marine zone of the Russian Far East: from exploration to sustainable development: Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 20th anniversary of the UNESCO «Marine Ecology» International Chair of FEFU (Vladivostok, 8–10 November, 2018): Proceedings.* Vladivostok: Izd-vo DVFU, p. 54–56. (In Russ., abstr. in Engl.). URL: <http://ihaefe.org/wp-content/uploads/matunesko-dvfu-2018.pdf>
7. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii: masshtab 1:1 000 0000 (tret'ye pokoleniye).* 2016. Seriya Dal'nevostochnaya. List M-54 – Aleksandrovsk-Sakhalinskiy: Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation, scale 1:1 000 000 (third generation). Far East series. Sheet M-54 – Aleksandrovsk-Sakhalinskiy: Explanatory note]. Saint Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 599 p.
 8. [Method of quantitative chemical analysis. Determination of As, Pb, Cd, Sn, Cr, Cu, Fe, Mn and Ni in the samples of food products and food raw materials by atomic absorption method with electrothermal atomization no. M-02-1009-08. 2009. Certified by the D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology (VNIIM). Certification no. 242/43-09 from 08.07.2009. Analit Ltd., 21 p.] (In Russ.).
 9. Zarykhta V.V., Zhang Z.H., Kuznetsova T.V., Ozerskiy P.V., Feng Y.J. 2020. Differential accumulation of heavy metals in soft tissues of three bivalvian species from the Songhua River near Harbin (China). *J. of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 56(2): 125–132. <https://doi.org/10.1134/s0022093020020040>
 10. Müller W.E.G., Batel R., Lacorn M., Steinhart F.I., Simat T., Lauenroth S., Hassanein H., Schroder H.C. 1998. Accumulation of cadmium and zinc in the marine sponge *Suberites domuncula* and its potential consequences on single-strand breaks and on expression of heatshock protein: a natural field study. *Marine Ecology Progress Series*, 167: 127–135. <https://doi.org/10.3354/meps167127>
 11. Dolmatova L.S., Slin'ko Ye.N., Kolosova L.F. 2010. The contents of heavy metals in tissues of holothurians *Eupentacta fraudatrix* in Peter the Great Gulf. *Izv. Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Izv. of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 12(5): 1287–1291. (In Russ., abstr. in Engl.). URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2010/2010_1_1287_1291.pdf
 12. Vinogradov A.P. 1953. *The elementary chemical composition of marine organisms*: transl. from Russian. New Haven, Yale Univ., 14, 647 p. (Mem. Sears Foundation for Marine Research; N 2).
 13. Pokarzhvskiy A.D. 1993. *Geokhimicheskaya ekologiya nazemnykh i pochvennykh zhivotnykh (bioindikatsionnyye i radioekologicheskiye aspekty) [Geochemical ecology of terrestrial and soil animals (bioindicative and radioecological aspects)]*: [doctoral diss. in biological sciences]. Moscow. (In Russ.).
 14. Narevich I.S., Kovekovdova L.T. 2017. [Trace elements (As, Cd, Pb, Fe, Cu, Zn, Se, Hg) in commercial crustaceans of the Sea of Japan]. *Izvestiya TINRO*, 189: 147–155. (In Russ.).

Об авторах

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

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

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

Марыжихин Всеволод Евгеньевич, специалист

About the Authors

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

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

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

Maryzhikhin, Vsevolod E., Specialist

Поступила в редакцию 30.05.2022
После рецензирования 20.07.2022
Принята к публикации 25.07.2022

Received 30 May 2022
Revised 20 July 2022
Accepted 25 July 2022

На печатную версию журнала «Геосистемы переходных зон» на 2023 год можно оформить подписку на сайте Объединенного каталога "Пресса России" www.pressa-rf.ru и через интернет-магазин «Пресса по подписке» (<https://www.akc.ru>) (подписной индекс 80882), а также по электронному каталогу Почты России (индекс ПС539)

You can subscribe to the printed version of the «Geosystems of transition zones» journal for 2023 on the website of the United Catalogue "Press of Russia" (www.pressa-rf.ru) and in the online store "Press on subscription" (<https://www.akc.ru>) (subscription index 80882), as well as on the electronic catalog of the Russian Post (index ПС539)

