ISSN 2541-8912 eISSN 2713-2161

ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН



https://doi.org/10.30730/gtrz

Геосистемы переходных зон Том 4 № 3 2020 Июнь – Сентябрь

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

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.

Журнал индексируется и архивируется в: Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Журнал регистрируется в системе **CrossRef** Научным публикациям присваивается идентификатор DOI

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени 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)
- 25.00.04. Петрология, вулканология (геолого-минералогические)
- 25.00.10. Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых
- (геолого-минералогические; физико-математические) 25.00.25. Геоморфология и эволюционная география
- 20.00.20. геоморфология и эволюционная география (*seospaфuчeckue*)
- 25.00.28. Океанология (географические; геолого-минералогические; физико-математические)
- 25.00.35. Геоинформатика (геолого-минералогические; физико-математические) 25.00.36. Геоэкология
- (геолого-минералогические; географические)
- 01.02.04. Механика деформируемого твердого тела (физико-математические; технические)

IISSN 2541-8912 (Print), ISSN 2713-2161 (Online) GEOSYSTEMS OF TRANSITION ZONES Vol. 4 No 3 2020 June – September

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

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.

The Journal is indexed and archived in: Russian Index of Scientific Citations (RISC)

Journal Issues are registered in the **CrossRef** system (each article is assigned an individual number – DOI)

The Journal is included in the List of peer reviewed scientific journals in which main research results from the dissertations of Candidates of Sciences (Ph.D) and Doctor of Sciences (Dr.Sci.) 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)
- 25.00.04. Petrology and volcanology (Geology and Mineralogy)
- 25.00.10. Geophysics, geophysical methods of exploration activity (Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics)
- 25.00.25. Geomorphology and evolutionary geography (Geography)
- 25.00.28. Oceanology (Geography; Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics)
- 25.00.35. Geoinformatics (Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics)
- 25.00.36. Geoecology (Geology and Mineralogy; Geography)
- 01.02.04. Mechanics of deformable solids (Physics and Mathematics; Engineering)

Адрес учредителя и издателя ИМГиГ ДВО РАН ул. Науки, 1б, Южно-Сахалинск, 693022 Тел./факс: (4242) 791517 E-mail: gtrz-journal@mail.ru Сайт: http://www.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://www.journal.imgg.ru**

© ИМГиГ ДВО РАН, 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

- Левин Борис Вульфович, член-корреспондент РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, главный научный сотрудник лаборатории цунами им. С.Л. Соловьева; Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, научный руководитель
- Заместитель главного редактора
- Богомолов Леонид Михайлович, д-р физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, директор, руководитель Центра коллективного пользования
- Адушкин Виталий Васильевич, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт динамики геосфер РАН; Московский физико-технический институт, Москва
- Алексанин Анатолий Иванович, д-р техн. наук, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
- Быков Виктор Геннадьевич, д-р физ.-мат. наук, Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск
- Завьялов Петр Олегович, член-корреспондент 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
- Левин Владимир Алексеевич, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток; Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- Лучин Владимир Александрович, д-р геогр. наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- Марапулец Юрий Валентинович, д-р физ.-мат. наук, доцент, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка
- 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. РАЕН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- Плехов Олег Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
- Прытков Александр Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск – ответственный секретарь
- 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
- Рыбин Анатолий Кузьмич, д-р физ.-мат. наук, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Кыргызстан
- Сасорова Елена Васильевна, д-р физ.-мат. наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
- Троицкая Юлия Игоревна, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород; Нижегородский гос. университет им Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
- Фирстов Павел Павлович, д-р физ.-мат. наук, Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский
- 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
- **Ярмолюк Владимир Викторович**, академик РАН, д-р геол.-минер. наук, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Переводчик Качесова Галина Сергеевна

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

• Boris W. Levin, Corresponding Member of the RAS, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk; P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the RAS, Moscow, Russia

Deputy Editor-in-Chief

- Leonid M. Bogomolov, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
- Vitaly V. Adushkin, Academician of RAS, Dr. Sci. Phys. and Math., Institute of Geosphere Dynamics of the RAS; Moscow Institute of Physics and Technology
- 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 the RAS, Dr. Sci. Geogr., P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the 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 the RAS, Moscow
- Andrei A. Kurkin, Dr. Sci. Phys. and Math., Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod
- 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. Obzhirov, Dr. Sci. Geol.-Miner., Professor, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- Stanislav A. Ogorodov, Prof. RAS, Dr. Sci. Geogr., Corr. Member of the RAES, Lomonosov Moscow State University, Moscow
- Oleg A. Plekhov, Dr. Sci. Phys. and Math., Professor, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the RAS, Perm'
- Alexander S. Prytkov, Cand. Sci. Phys. and Math., Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk – Executive Secretary
- Yuri L. Rebetskiy, Dr. Sci. Phys. and Math., Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow
- Mikhail V. Rodkin, Dr. Sci. Phys. and Math., Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the RAS, Moscow
- Anatoly K. Rybin, Dr. Sci. Phys. and Math., Research Station of Russian Academy of Sciences in Bishkek City, Bishkek, Kyrgyzstan
- Elena V. Sasorova, Dr. Sci. Phys. and Math., P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the RAS, Moscow
- Yuliya I. Troitskaya, Dr. Sci. Phys. and Math., Professor, Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhniy Novgorod; Lobachevsky University, Nizhniy Novgorod
- Pavel P. Firstov, Dr. Sci. Phys. and Math., FRC "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences", Kamchatka Branch, Petropavlovsk-Kamchatsky
- Renat B. Shakirov, Dr. Sci. Geol.-Miner., Associate Professor, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- Georgy V. Shevchenko, Dr. Sci. Phys. and Math., Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk
- Vladimir V. Yarmolyuk, Academician of RAS, Dr. Sci. Geol.-Miner., Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the RAS, Moscow

Translator Galina S. Kachesova

Геосистемы переходных зон

Том 4 № 3 2020 Июнь- Сентябрь

https://doi.org/10.30730/gtrz-2020-4-3 http://journal.imgg.ru

ISSN 2713-2161 (Online) GEOSYSTEMS OF TRANSITION ZONES

Vol. 4 No 3 2020 June- September

http://journal.imgg.ru

https://doi.org/10.30730/gtrz-2020-4-3

Содержание

Геофизика, сейсмология

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

Океанология.

Геоморфология и эволюционная география

Общая и региональная геология. Вулканология

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

Геоэкология

 Content

Geophysics. Seismology

TRANSLATION

SHORT REPORT

Oceanology.

Geomorphology and evolutionary geography

TRANSLATION

R.F. Bulgakov, V.V. Afanas'ev. Effect of hydroisostatic compensation depending on the shelf width on the example of the Laptev and East Siberian seas

General and regional geology. Volcanology

TRANSLATION

O.A. Nikitenko, V.V. Ershov. Hydrogeochemical characteristics of mud volcanism manifestations on Sakhalin Island 336 SHORT REPORT

Geoecology

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.).

Перевод Качесова Галина Сергеевна Редактор к.ф.н. Низяева Галина Филипповна Дизайн Леоненкова Александра Викторовна Компьютерная верстка Филимонкина Анна Александровна Корректор Качесова Галина Сергеевна Типография: 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 15.

http://www.imgg.ru

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 6,8. Уч.-изд. л. 10,9. Тираж 150 экз. Заказ 7936. Свободная цена. Подписано в печать 30.09.2020.

Подписной индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 80882 По вопросам распространения обращаться также E-mail: gtrz-journal@mail.ru Editor Galina Ph. Nizyaeva, Cand. Sci. in Phylology Design Alexandra V. Leonenkova Desktop publishing Anna A. Filimonkina Proofreader Galina S. Kachesova Publisher: 1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022. http://www.imgg.ru Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 6,8. Number of copies 150. Order no. 7936. Free price. Date of publishing 30.09.2020. Subscription index in catalogue of the "Rospechat" agency – 80882 The Editorial Office can also be contacted by: E-mail: gtrz-journal@mail.ru

Translation by Galina S. Kachesova

УДК 550.8.04+550.343.62

Долговременные тренды подпочвенного радона на Камчатке как индикаторы подготовки землетрясений с *M* > 7.5 в северо-западном обрамлении Тихого океана

©2020 П. П. Фирстов*1, Е. О. Макаров^{1,2}

¹Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Россия ²Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга,

Петропавловск-Камчатский, Россия

*E-mail: firstov@emsd.ru

Резюме. В работе приведены результаты мониторинга объемной активности подпочвенного радона в тензочувствительной точке опорного пункта «Паратунка» (PRTR) за 2000–2020 гг. Эманационные наблюдения в данной точке ведутся с целью поиска предвестников сильных землетрясений в вариациях подпочвенного радона. Подготовка землетрясений северо-западного обрамления Тихого океана с глубиной очага H < 200 км и $M_w > 7.5$, а в некоторых случаях и меньшей магнитуды, произошедших на расстояниях до 1000 км от PRTR, находит отражение в динамике объемной активности радона (OA Rn) в виде трендов длительностью от 8 мес. до 3 лет. Поведение динамики OA Rn в последние 5 лет указывает на возможное землетрясение с $M_w > 7.5$ в акватории Тихого океана вблизи восточного побережья п-ова Камчатка, которое может произойти до 01.02.2021 г. Этот вывод согласуется с долгосрочным сейсмическим прогнозом для Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, сделанный в работах С.А. Федотова с А.В. Соломатиным [2017, 2019], согласно которому наиболее высокая вероятность землетрясения с $M_w \ge 7.7$ приходится на Авачинский залив и южную Камчатку.

Ключевые слова: полуостров Камчатка, подпочвенный радон, зона влагонасыщения, долговременные тренды, предвестник, землетрясение

Для цитирования: Фирстов П.П., Макаров Е.О. Долговременные тренды подпочвенного радона на Камчатке как индикаторы подготовки землетрясений с M > 7.5 в северо-западном обрамлении Тихого океана. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 3, с. 270–287. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.270-278.279-287 *For citation:* Firstov P.P., Makarov E.O. Long-term trends of subsoil radon in Kamchatka as indicators for the preparation of earthquakes with M > 7.5 at the northwestern framing of the Pacific Ocean. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 270–287. (Russ. & Engl.).

perehodnykh zon = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 270–287. (R https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.270-278.279-287

Long-term trends of subsoil radon in Kamchatka as indicators for the preparation of earthquakes with M > 7.5at the northwestern framing of the Pacific Ocean

Pavel P. Firstov^{*1}, Evgeniy O. Makarov^{1,2}

¹Kamchatka Branch of the FRC "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences", Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

²Kamchatka State University named after Vitus Bering, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia *E-mail: firstov@emsd.ru

Abstract. The paper presents the results of the volume activity monitoring of subsoil radon at the strainsensitive point of the Paratunka control station (PRTR) for 2000–2020. Emanation observations are carried out at this point in order to search for precursors of strong earthquakes in subsoil radon variations. The preparation of earthquakes at the northwestern framing of the Pacific Ocean with a source depth H < 200 km and $M_w > 7.5$, and of a lower magnitude in some cases, which have occurred at the distances up to 1000 km from PRTR, is reflected in the dynamics of radon volume activity (RVA) in the form of trends lasting from 8 months to 3 years. The behavior of RVA dynamics in the last 5 years points to a possible earthquake with $M_{\rm w} > 7.5$ in the Pacific Ocean in the vicinity of the eastern coast of the Kamchatka Peninsula, which may occur before February 1, 2021. This conclusion is consistent with a long-term seismic forecast for the Kuril-Kamchatka seismogenic zone, made in the works of S.A. Fedotov and A.V. Solomatin [2017, 2019], according to which the highest probability of an earthquake with $M_{\rm w} \ge 7.7$ falls on the Avacha Bay and Southern Kamchatka.

Keywords: Kamchatka Peninsula, subsoil radon, moisture saturation zone, long-term trends, precursor, earthquake

Финансирование

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-05-00493).

Введение

Радон (²²²Rn), образующийся в результате распада радия и доступный для непрерывной регистрации в воздухе подпочв, очень чувствителен к изменениям геодинамического состояния среды. Это позволяет рассматривать его в качестве индикатора изменений структуры исследуемого участка земной коры, пористости, проницаемости каналов миграции газа, а также как отклик геосреды на внешние воздействия [Адушкин, Спивак, 2014; Рудаков, 2009].

Аномалии в поле радона, как вестник приближающегося землетрясения, широко исследовались в последние десятилетия. С целью поиска предвестников сильных землетрясений во многих сейсмоактивных регионах мира с 1980-х годов велась регистрация объемной активности радона (ОА Rn), растворенного в воде и в воздухе подпочв. Сведения об информативности радонового метода для поиска предвестников землетрясений можно найти в обзорных работах [Сicerone et al., 2009; Petraki et al., 2015; Giuseppina, Morelli, 2012; Фирстов, Макаров, 2015].

Краткосрочные предвестники землетрясений с магнитудой M > 4.5 в поле подпочвенного радона с временем упреждения до 15 сут были зарегистрированы во многих районах мира [inan et al., 2008; Baykara et al., 2009; Фирстов, Макаров, 2018; Бирюлин и др., 2019]. В динамику поля подпочвенного радона существенный вклад вносят метеорологические величины (температура воздуха, атмосферное давление, осадки). Они обусловливают значительную зашумленность (the noise component) исходных данных, затрудняющую выделение предвестниковых аномалий. Это заставляет применять специальные методы выделения предвестниковых аномалий [Giuseppina, Morelli, 2012; Piersanti et al., 2016; Фирстов и др., 2018; Iwata et al., 2018; Паровик, 2014].

В литературе сравнительно редко встречаются описания среднесрочных и долгосрочных предвестников сильных землетрясений в поле подпочвенного радона. Аномалии в виде длительных трендов перед сильными землетрясениями отмечены для некоторых сильных землетрясений Японии. Перед разрушительным землетрясением Идзу-Осима (Izu Oshima) 14.01.1978 г. с $M_{w} = 7.0$ на расстоянии 30 км от эпицентра в течение 2.5 мес. наблюдалась аномалия концентрации подпочвенного Rn, синхронная с вертикальными деформациями земной поверхности [Wakita, 1981; Majumdar, 2004]. Перед мегаземлетрясением Тохоку (Япония) 11.03.2011 г. с $M_{_{\rm W}} = 9.0$ в воде артезианской скважины за 4.5 мес. до события начался рост ОА Rn, который продолжался и после землетрясения. Общая длительность аномалии составила 8 мес. [Tsunomori et al., 2011].

Наблюдения за поведением ОА Rn в течение длительного периода на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне позволяют утверждать о наличии определенной связи между ОА Rn и сильными землетрясениями с магнитудой $M_{w} > 7.5$ северо-западного обрамления Тихого океана [Фирстов, 2014; Фирстов, Макаров, 2018; Фирстов и др., 2018]. Под северо-западным обрамлением Тихого океана подразумевается область, где происходит взаимодействие трех крупнейших на земном шаре плит: Евразийской (EUR), Тихоокеанской (PAC) и Североамериканской (NAM) (рис. 1). Взаимодействие этих плит сопровождается интенсивными горизонтальными движениями до 9 мм/год, в результате которых возникают сильные землетрясения с $M_w = 7.5-9$ на глубинах от нескольких до сотен километров. Рассматриваемый район включает Алеутскую и Курило-Камчатскую сейсмогенные зоны, а также северную часть Японской зоны (рис. 1).

В данной работе подведены итоги двадцатилетних наблюдений за поведением ОА Rn в информативной точке в опорном пункте «Паратунка». По мнению авторов, динамика OA Rn в этой точке отражает напряженно-деформированное состояние района зоны субдукции, в которой расположен пункт регистрации.

Аппаратура и методика наблюдений

Сеть мониторинга подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (ПКГП) включает в себя пять пунктов, оснащенных комплексами регистрации подпочвенных газов [Макаров и др., 2012]. В условиях необходимости обеспечивать мониторинг ОА Rn длительное время наиболее надежным и метрологически простым оказался метод ее регистрации в воздухе подпочв по β -излучению продуктов распада RaC и RaB с помощью газоразрядных счетчиков. Многолетняя регистрация Rn в подпочвенном воздухе на сети пунктов ПКГП показала высокую эксплуатационную надежность применяемого оборудования.

В опорном пункте «Паратунка» (PRTR) (рис. 1) один из датчиков был удачно установлен в зоне влагонасышения с повышенной тензочувствительностью к изменениям напряженно-деформированного состояния геосреды. Механизм реакций различных геофизических полей, проявляющийся при разнообразных возмущениях напряженно-деформированного состояния среды, определяет тензочувствительность той или иной точки регистрации. Как правило, структурное положение тензочувствительных зон свидетельствует об их принадлежности к подвижным контактам крупных блоков [Киссин, 2011].

Пункт PRTR расположен на речной террасе ручья Коркина, трассирующего субширотный разлом в пределах Паратунского грабена с приуроченной к нему одноименной геотермальной системой, и находится в зоне динамического влияния этого разлома. На расстоянии ~700 м от пункта PRTR ниже по течению ручья наблюдаются естественные выходы термальных вод с содержанием растворенного Rn до 1.5 кБк/м³. По данным георадарного профилирования, непосредственно под датчиком находится участок разуплотнения [Фирстов, Макаров, 2018]. На взгляд авторов, наличие зоны динамического влияния разлома, а также участка разуплотнения обеспечивает тензочувствительность данной точки.

В работе использованы данные ОА Rn, полученные с дискретизацией 30 мин с датчика на глубине ~3.5 м в зоне влагонасыщения пункта PRTR. Для минимизации влияния вариаций атмосферного давления исходный временной ряд ОА Rn подвергался барокомпенсации. Затем выполнялась децимация в полусуточном интервале. С целью фильтрации высокочастотной составляющей последним этапом обработки данных было сглаживание скользящим средним в пятисуточном окне [Фирстов, 2014; Фирстов, Макаров, 2018]. Из полученного временного ряда ОА Rn с помощью аддитивной модели [Бокс, Дженкинс, 1974] вычиталась сезонная годовая составляющая, обусловленная сезонной вариацией температуры воздуха. Ход полученной кривой сопоставлялся с последовательностью землетрясений с $M_{w} > 7.5$ северозападной окраины Тихого океана.

Сильные землетрясения северо-западного обрамления Тихого океана в 2000–2020 гг.

В выборку наиболее сильных землетрясений северо-западного обрамления Тихого океана за период с 01.11.2000 по 01.04.2020 г. были включены 13 землетрясений с $M_w > 7.5$ и два с $M_w < 7.5$. Параметры выбранных землетрясений брались из каталога NEIC (National Earthquake Information Center, США, https://www.usgs. gov/natural-hazards/ earthquake-hazards/ national-earthquake-information-center-neic).



рамления Тихого океана за 2000-2020 гг. с добавлением Жупановского ($M_w = 7.2$) и землетрясения Углового поднятия ($M_w = 7.3$). Справа схема расположения пунктов регистрации подпочвенного радона на п-ове Камчатка: 1 – пункты регистрации ОА Rn (пункт INSR расположен в другом структурном элементе побережья Авачинского залива и в данной статье не рассматривается); 2 - наиболее крупные разломы; 3 - разломы второго порядка [Попруженко, Зубин, 1997]. Номера землетрясений соответствуют таблице.

Nº	Дата	Время, чч:мм:сс	Коорд ф° с.ш.	инаты λ° в.д.	- <i>Н</i> , км	$M_{_{ m W}}$	<i>R</i> , км	Область эпицентра землетрясения
1	25.09.2003	19:50:27	41.81	143.91	27	8.3	1640	Япония, о. Хокайдо
2	17.11.2003	06:43:06	51.15	178.65	33	7.8	1420	Алеуты, Крысьи острова
3	20.04.2006	23:52:02	60.94	167.14	22	7.6	1035	Олюторское, север п-ова Камчатка
4	15.11.2006	11:14:13	46.58	153.27	10	8.3	800	Средние Курилы,
5	13.01.2007	04:23:21	46.23	154.55	10	8.1	800	вблизи о. Симушир
6	05.07.2008	02:12:04	53.88	152.89	632	7.7	370	Охотское море
7	11.03.2011	05:46:24	38.10	142.85	24	9.0	2050	Тохоку мегаземлетрясение
8	14.08.2012	02:59:38	49.80	145.06	583	7.7	980	Охотское море
9	24.05.2013	05:44:48	54.89	153.22	609	8.3	390	Охотоморское землетрясение
10	23.06.2014	20:53:09	51.85	178.74	109	7.9	1400	Алеуты, Крысьи острова
11	30.01.2016	03:25:12	54.01	158.01	177	7.2	110	Жупановское землетрясение
12	17.07.2017	23:34:13	54.17	168.82	82	7.7	710	Ближне-Алеутское землетрясение
13	23.01.2018	9:31:40	56.01	149.17	14	7.9	3350	Район Аляски
14	20.12.2018	17:01:55	55.10	164.70	17	7.3	490	Землетрясение Углового поднятия
15	25.03.2020	2:49:21	48.99	157.69	57	7.5	440	Северные Курилы, напротив о-ва Парамушир

Таблица.	Наиболее с	сильные	землетрясения	северо-западног	о обрамления	Тихого	океана
за перио	д 01.11.2000	0-01.04.20	020 гг.				

Примечание. Н – глубина очага, M_w – магнитуда, R – расстояние от эпицентра до PRTR. Выделены землетрясения Курило-Камчатской сейсмогенной зоны.

1 ٠ 2

3

Дополнительно в выборку из-за близости очага к пункту PRTR (110 км) было включено Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $M_{\rm w} = 7.2$ и H = 177 км [Чебров и др., 2016], а также землетрясение Углового поднятия 20.12.2018 г. с $M_{\rm w} = 7.3$ и H = 17 км в зоне сочленения Камчатского и Алеутского океанических желобов [Чебров и др., 2020]. Параметры выбранных землетрясений приведены в таблице, а на рис. 1 показана карта их эпицентров. Карта подготовлена на основе данных GoogleMaps, полученных из открытых источников, с использованием программы MapInfo и цифровой топоосновы масштаба 1 : 1 000 000.

В нашей выборке 9 землетрясений Курило-Камчатской сейсмогенной зоны: 6 с глубинами H < 180 км и 3 чисто субдукционных землетрясения с H > 500 км (выделены красным цветом на карте рис. 1), 4 события в Алеутской сейсмогенной зоне и 2 в районе Японских островов, в том числе мегаземлетрясение Тохоку с $M_w = 9.0$.

Динамика подпочвенного радона в зоне влагонасыщения пункта PRTR

Рассмотрим особенности динамики подпочвенного радона относительно землетрясений нашей выборки (рис. 2). Для всего периода наблюдений среднее значение ОА Rn составило 8.21 ± 1.07 кБк/м³. На этом фоне в поведении ОА Rn можно выделить несколько трендов, когда значение ОА Rn плавно возрастало на ~33 % с последующим резким падением на 30 % и более (рис. 2). Длительность таких периодов составила от 8 мес. до 3 лет.

С июля 2003 по декабрь 2005 г. на кривой наблюдался тренд I увеличения значений ОА Rn до 20 % с последующим резким бухтообразным падением значений на 30 % ниже начальных величин. Длительность бухты составила почти 1.5 года. Сразу после падения значений ОА Rn в районе Курило-Камчатской сейсмогенной зоны начался период сейсмической активизации, включающий цепочку из 3 землетрясений с магнитудами $M_w = 7.6-8.3$. На севере Камчатки в Корякском нагорье 20.04.2006 г. произошло Олюторское землетрясение (№ 3, см. таблицу) с $M_w = 7.6$, а затем 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. на средних Курилах возник дуплет Симуширских

землетрясений с $M_{w} = 8.3$ и с $M_{w} = 8.1$ (№ 4, 5, см. таблицу) соответственно (рис. 1 и 2).

Подготовка землетрясения 25.09.2003 г. с $M_{w} = 8.1$ вблизи о. Хоккайдо не нашла отражение в ОА Rn, однако перед мегаземлетрясением Тохоку $M_{w} = 9.0$, произошедшим в Японии 11.03.2011 г. на расстоянии 2100 км от пункта регистрации (№ 7 из таблицы), наблюдался слабо выраженный тренд **II** роста значений ОА Rn, который начался в марте 2010 г. и продолжался 8 мес. до ноября 2010 г. (рис. 2).

Почти три года с января 2012 г. по февраль 2015 г. наблюдался тренд III, когда ОА Rn возросла на 33 % с 7.5 до 10 кБк/м³ (рис. 2). В течение этого периода произошли три землетрясения (№ 8, 9, 10, см. таблицу), отклика на которые в динамике ОА Rn не отмечалось. На взгляд авторов, это объясняется тем, что землетрясения № 8, 9 – глубокие землетрясения с H > 500 км, а землетрясение № 10 произошло в Алеутской сейсмогенной зоне на значительном расстоянии от пункта наблюдений (1400 км).

Исходя из поведения тренда III OA Rn, аналогичного тренду I, был сделан среднесрочный прогноз возникновения в ближайшие годы одного или серии сильных землетрясений на глубинах до 70 км в северо-западной окраине Тихого океана, включая его акваторию, примыкающую к п-ову Камчатка. Данный прогноз был опубликован в работах [Фирстов, 2014; Фирстов, Макаров, 2015], а также передан в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений и оценке сейсмической опасности и риска. Произошедшее 30 января 2016 г. Жупановское землетрясение с *M*_w = 7.2 и глубиной очага *H* = 177 км (№ 11 из таблицы) рассматривается авторами как частичная реализация этого прогноза [Фирстов и др., 2017].

С октября 2016 г. начался тренд IV, прерывистый и осложненный кратковременным падением OA Rn (рис. 2). После двухлетнего возрастания OA Rn с 7 до 10 кБк/м³ в течение 2 мес. (сентябрь–ноябрь 2017 г.) наблюдалось резкое падение OA Rn до начальных значений. В окрестности этого падения произошло Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w = 7.7$ (№ 12), которое относится к сильнейшим задуговым мелкофокусным землетрясения под Беринговым морем. Его эпицентральная зона афтершоков



ОА Rn с учетом сезонности, РRTR, кБк/м³

оценивается в ~500 км, что в 3-5 раз превышает линейные размеры очага для землетрясений с магнитудой 7.7-7.8 [Чебров и др., 2017]. Землетрясение № 13 с $M_{_{W}} = 7.9$, произошедшее на расстоянии 3350 км, не нашло отклика в динамике подпочвенного радона. После этого рост значений ОА Rn продолжился. К декабрю 2018 г. значение ОА Rn достигло максимальных значений за весь период наблюдений – 12 кБк/м³, после чего начался резкий спад. В окрестности этого времени произошло землетрясение Углового поднятия с *M*_w = 7.3 [Чебров и др., 2020]. После пятимесячного перерыва ОА Rn начала вновь падать, и в настоящее время значение ОА Rn минимальное за весь период наблюдений – 5 кБк/м³.

Методом наименьших квадратов для **I**, **III** и **IV** трендов вычислялась линейная зависимость OA Rn (Бк/м³) = f(t) (сут). Все три зависимости (1)–(3), аппроксимирующие тренды, очень близки между собой:

I OA Rn (Kr/M^3) = 0.0026·*t* (cyr) – 100.11, (1) **III** OA Rn (Kr/M^3) = 0.0027·*t* (cyr) – 100.64, (2) **IV** OA Rn (Kr/M^3) = 0.0022·*t* (cyr) – 86.79. (3)

Схожесть линейных зависимостей (1)–(3) свидетельствует о едином процессе, происходящем в зоне Паратунского грабена перед сильными землетрясениями северо-западного обрамления Тихого океана с эпицентрами на расстоянии до 1000 км от пункта регистрации PRTR.

Рассмотрим зависимость проявления предвестников в поле подпочвенного радона от эпицентрального расстояния для землетрясений с $M_w > 7.5$ согласно таблице. На рис. 3 выделено поле, ограниченное землетрясениями № 11, 4, 3, 14, в которое попадают все землетрясения, произошедшие после выделенных трендов (см. рис. 2). На основании рис. 3 можно сделать следующие выводы.

1. Подготовка землетрясений с $M_w > 7.5$, а в некоторых случаях и меньшей магнитуды, произошедших на расстояниях до 1000 км от пункта регистрации PRTR, с глубиной очага H < 200 км (N_2 3, 4, 5, 11, 12, 14, 15), находит отражение в динамике подпочвенного радона в зоне полного влагонасыщения.

2. Подготовка сильных глубоких ($M_w > 7.7$, H > 500 км) субдукционных землетрясений (\mathbb{N}_{2} 6, 8, 9) в динамике подпочвенного радона явного проявления не имеет.



Рис. 3. Соотношение между магнитудой и расстоянием от пункта наблюдений до эпицентра рассмотренной выборки землетрясений с $M_w > 7.5$ с добавлениями Жупановского землетрясения и землетрясения Углового поднятия. Красными кружками отмечены землетрясения, подготовка которых нашла отражение в поле подпочвенного радона, желтым цветом выделено поле (в координатах M_w и R) действия отклика подпочвенного радона на сильные землетрясения региона. Номера соответствуют номерам землетрясений в таблице.

3. Для сильных событий, произошедших на расстояниях более 1000 км от пункта регистрации PRTR, также не наблюдается предвестниковых трендов. Даже подготовка мегаземлетрясения Тохоку с $M_w = 9.0 (N_P 7)$ очень слабо отразилась в поле подпочвенного радона.

Заключение

Результаты мониторинга ОА Rn в течение 2000–2020 гг. на п-ове Камчатка в опорном пункте «Паратунка» (PRTR), полученные методом пассивной регистрации в накопительной камере, показали следующее. Подготовка землетрясений северо-западного обрамления Тихого океана с глубиной очага H < 200 км и $M_{w} > 7.5$, а в некоторых случаях и меньшей магнитуды, произошедших на расстояниях до 1000 км от PRTR, находит отражение в динамике OA Rn. Выделено 4 периода длительностью от 8 мес. до 3 лет, когда значение ОА Rn плавно возрастало на ~33 % с последующим резким падением на 30 % и более. Тренды I и III периодов предшествовали землетрясениям с $M_{\rm w} = 7.2 - 8.1$ на расстоянии до 1000 км от PRTR в районе, приуроченном к северо-западному обрамлению Тихого океана. Тренд IV длительностью ~3 года (2016–2018)

в максимуме имел самые большие значения ОА Rn, а в последние два года отмечено падение значений ОА Rn до минимальных за весь период наблюдений. Следует добавить, что подобное поведение динамики ОА Rn наблюдалось и в пункте INSR (рис. 1), расположенном в другом структурном элементе побережья Авачинского залива.

На основании наблюдаемой корреляции трендов динамики ОА Rn и сильных землетрясений можно с большой долей вероятности прогнозировать возможное сильное землетрясение в районе п-ова Камчатка. Следует отметить, что после падения значений ОА Rn по окончании тренда IV уже произошло два события: землетрясение Углового поднятия с $M_w = 7.3$ (№ 14 в таблице и на рис. 1 и 3)

и внутриплитовое землетрясение с $M_{\rm w} = 7.5$ (№ 15). Однако особенности динамики ОА Rn указывают на большую вероятность землетрясения с M_w > 7.5 в районе п-ова Камчатка. Исходя из предшествующих наблюдений, прогнозируемое землетрясение следует ожидать до 1 февраля 2021 г. Эти данные согласуются с долгосрочным сейсмическим прогнозом для Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, сделанным в работах С.А. Федотова с А.В. Соломатиным [2017, 2019], согласно которому наиболее высокая вероятность землетрясения с $M_{\rm w} \ge 7.7$ приходится на Авачинский залив и южную Камчатку. Интенсивность такого землетрясения в г. Петропавловск-Камчатский может быть более 7 баллов.

Список литературы

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. **2014.** *Физические поля в приповерхностной геофизике*. М.: ГЕОС, 349 с. 2. Бокс Дж., Дженкинс Г. **1974.** *Анализ временных рядов. Прогноз и управление*. М.: Мир, 406 с.

3. Бирюлин С.В., Козлова И.А., Юрков А.К. **2019.** Исследование информативности объемной активности почвенного радона при подготовке и реализации тектонических землетрясений на примере Южно-Курильского региона. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 4(44): 73–83. doi:10.31431/1816-5524-2019-4-44-73-83

4. Киссин И.Г. **2011.** Тензочувствительность флюидонасыщенных сред. *Вулканология и сейсмология*, 3: 34–45. doi:10.1134/S0742046311030055.

5. Паровик Р.И. **2014.** *Математические модели классической теории эманационного метода.* Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 128 с.

6. Попруженко С.В., Зубин М.И. **1997.** Тектоника и некоторые особенности сейсмичности шельфовой зоны Авачинского залива и прилегающих районов. *Вулканология и сейсмология*, 2: 74–82.

7. Рудаков В.П. 2009. Эманационный мониторинг геосред и процессов. М.: Научный мир, 175 с.

8. Федотов С.А., Соломатин А.В. **2017.** Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV. 2016 – III. 2021 гг., его развитие и применение; особенности сейсмичности Курило-Камчатской дуги до и после глубокого Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г., *M* = 8.3. *Вулканология и сейсмология*, 3: 3–17. https://doi.org/10.7868/S0203030617030014

9. Федотов С.А., Соломатин А.В. **2019.** Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019–V 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017–V 2019 гг. Развитие и практическое применение метода ДССП. *Вулканология и сейсмология*, 6: 6–22. https://doi.org/10.31857/s0203-0306201966-22

10. Фирстов П.П. **2014.** Возможности прогноза сильных землетрясений по данным радонового мониторинга на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле,* 2(1): 232–245.

11. Фирстов П.П., Макаров Е.О. **2015.** Реакция подпочвенного и растворенного в подземных водах радона на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры. *Сейсмические приборы*, 51(4): 58–80.

12. Фирстов П.П., Макаров Е.О. **2018.** Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 148 с.

13. Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухова И.П. **2017.** Особенности динамики подпочвенных газов перед Жупановским землетрясением 30.01.2016 г. с М = 7.2 (Камчатка). Доклады Академии наук, 472(4): 462–465. doi:10.7868/s0869565217040144

14. Фирстов П.П., Макаров Е.О. Глухова И.П., Будилов Д.И., Исакевич Д.В. **2018.** Поиск предвестниковых аномалий сильных землетрясений по данным мониторинга подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. *Геосистемы переходных зон*, 2(1): 16–32. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.1.016-032 15. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Дрознина С.Я., Иванова Е.И., Матвеенко Е.А., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Раевская А.А. и др. **2016.** Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $K_s = 15.7$, $M_w = 7.2$, I = 6 (Камчатка). Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 1(29): 5–16.

16. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Ландер А.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Титков Н.Н. **2017.** Ближнее Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w = 7.8$ на границе Командорской бреши. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 3(35): 22–25.

17. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др. **2020.** Землетрясение Углового поднятия 20 декабря 2018 г. $M_w = 7.3$ в зоне сочленения Камчатского и Алеутского океанических желобов. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 1(45): 100–117. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-1-45-100-117

18. Baykara O., İnceöz M., Doğru M., Aksoy E., Külahcı F. **2009.** Soil radon monitoring and anomalies in East Anatolian Fault System (Turkey). *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1(279): 159–164. https://doi.org/10.1007/s10967-007-7211-2

19. Cicerone R.D., Ebel J.E., Beitton J.A. 2009. Systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 476: 371–396. https://doi:10.1016/j.tecto.2009.06.008.

20. Immè G., Morelli D. **2012.** Radon as earthquake precursor. In: D'Amico S. (ed.) *Earthquake research and analysis – statistical studies, observations and planning*, 143–160. https://doi.org/10.5772/29917

21. Iwata D., Nagahama H., Muto J., Yasuoka Y. **2018.** Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes. *Scientific Reports*, 8(13028). https://doi.org/10.1038/s41598-018-31341-5

22. Inan S., Akgu T., Cemil S. **2008.** Geochemical monitoring in the Marmara region (NW Turkey): A search for precursors of seismic activity. *J. of Geophysical Research*, 113: B03401. https://doi.org/10.1029/2007JB005206

23. Majumdar K. **2004.** A study of fluctuation in radon concentration behaviour as an earthquake precursor. *Current science*, 9(86): 1288–1292.

24. Petraki E., Nikolopoulos D., Panagiotaras D., Cantzos D., Yannakopoulos P., Nomicos C., Stonham J. **2015**. Radon-222: A potential short-term earthquake precursor. *J. of Earth Science and Climatic Change*, 6(6): 000282. doi:10.4172/2157-7617.1000282

25. Piersanti A., Cannelli V., Galli G. **2016.** The Pollino 2012 seismic sequence: clues from continuous radon monitoring. *Solid Earth*, 7: 1303–1316. https://doi.org/10.5194/se-7-1303-2016

26. Tsunomori F., Tanaka H., Murakami M., Tasaka S. **2011.** Seismic response of dissolved gas in groundwater. In: *Proceedings of the 10th Taiwan-Japan Intern: Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, October 25, Taiwan, National Cheng Kung University.* Tainan, 29–35.

27. Wakita H. **1981.** Precursory changes in ground water prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake. *Earthquake Prediction: An Intern. Review*, 4: 527–532. https://doi.org/10.1029/ME004p0527

Об авторах

ФИРСТОВ Павел Павлович (ORCID: 0000-0003-1658-5165, ResearcherID: AAC-5308-2020), доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией акустического и радонового мониторинга, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Петропавловск-Камчатский, firstov@emsd.ru

МАКАРОВ Евгений Олегович (ORCID: 0000-0002-0462-3657, ResearcherID: AAL-1711-2020), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, лаборатория акустического и радонового мониторинга, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН); заведующий лабораторией, Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга (КамГУ им. Витуса Беринга), г. Петропавловск-Камчатский, ice@emsd.ru

UDK 550.8.04+550.343.62

Long-term trends of subsoil radon in Kamchatka as indicators for the preparation of earthquakes with M > 7.5at the northwestern framing of the Pacific Ocean

©2020 Pavel P. Firstov*1, Evgeniy O. Makarov^{1,2}

¹Kamchatka Branch of the FRC "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences", Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia ²Kamchatka State University named after Vitus Bering, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia *E-mail: firstov@emsd.ru

Abstract. The paper presents the results of the volume activity monitoring of subsoil radon at the strainsensitive point of the Paratunka control station (PRTR) for 2000–2020. Emanation observations are carried out at this point in order to search for precursors of strong earthquakes in subsoil radon variations. The preparation of earthquakes at the northwestern framing of the Pacific Ocean with a source depth H < 200 km and $M_w > 7.5$, and of a lower magnitude in some cases, which have occurred at the distances up to 1000 km from PRTR, is reflected in the dynamics of radon volume activity (RVA) in the form of trends lasting from 8 months to 3 years. The behavior of RVA dynamics in the last 5 years points to a possible earthquake with $M_w > 7.5$ in the Pacific Ocean in the vicinity of the eastern coast of the Kamchatka Peninsula, which may occur before February 1, 2021. This conclusion is consistent with a long-term seismic forecast for the Kuril-Kamchatka seismogenic zone, made in the works of S.A. Fedotov and A.V. Solomatin [2017, 2019], according to which the highest probability of an earthquake with $M_w \ge 7.7$ falls on the Avacha Bay and Southern Kamchatka.

Keywords: Kamchatka Peninsula, subsoil radon, moisture saturation zone, long-term trends, precursor, earthquake

For citation: Firstov P.P., Makarov E.O. Long-term trends of subsoil radon in Kamchatka as indicators for the preparation of earthquakes with M > 7.5 at the northwestern framing of the Pacific Ocean. *Geosistemy perehodnykh* zon = Geosystems of Transition Zones, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 270–287. (Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.270-278.279-287

Funding. This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 20-05-00493).

Introduction

Radon (²²²Rn), which is formed as a result of radium decay and available for continuous registration in the air of subsoils, is very sensitive to the changes in geodynamics state of the environment. This allows us to consider it as an indicator of changes in the structure of the studied area of the earth crust, porosity, permeability of gas migration channels, as well as the geological medium response to external influence [Adushkin, Spivak, 2014; Rudakov, 2009].

The radon field anomalies have been extensively studied during the last decades. To search for precursors of strong earthquakes in many seismically active regions all over the world, the radon volume activity (RVA) dissolved in water and in the air of subsoils has been recorded since the 1980s. Data on informative

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Фирстов П.П., Макаров Е.О. Долговременные тренды подпочвенного радона на Камчатке как индикаторы подготовки землетрясений с М > 7.5 в северо-западном обрамлении Тихого океана. *Translation by G.S. Kachesova*.

value of the radon method for the earthquakes' precursors searching can be found in the review works [Cicerone et al., 2009; Petraki et al., 2015; Giuseppina, Morelli, 2012; Firstov, Makarov, 2015].

Short-term precursors of earthquakes with a magnitude M > 4.5 in the field of subsoil radon with the lead time up to 15 days have been recorded in many regions around the world [inan et al., 2008; Baykara et al., 2009; Firstov, Makarov, 2018; Biryulin et al., 2019]. The meteorological parameters (air temperature, atmospheric pressure, precipitation) make a significant contribution to the dynamics of the field of subsoil radon. They condition the significant noise component of the initial data, which makes it difficult to distinguish the precursor anomalies. This forces to use special methods for precursor anomalies identifying [Giuseppina, Morelli, 2012; Piersanti et al., 2016; Firstov et al., 2018; Iwata et al., 2018; Parovik, 2014].

There are not many descriptions of mid- and long-term precursors of strong earthquakes in the field of subsoil radon in the literature. Anomalies in the form of long-term trends prior to strong earthquakes have been noted for some powerful events in Japan. The anomaly in the concentration of subsoil Rn synchronous with vertical deformations of the earth's crust was being observed for 2.5 months before the Izu Oshima destructive earthquake on January 1, 1978 with $M_{\rm w}$ = 7.0 at a distance of 30 km from the epicenter [Wakita, 1981; Majumdar, 2004]. The RVA began to increase in the water of the artesian well for 4.5 months before the Tohoku (Japan) megaearthquake on March 11, 2011 with $M_{\rm w} = 9.0$ and continued to grow after it. The total duration of the anomaly amounted for eight months [Tsunomori et al., 2011].

Observations of the RVA behavior during a long period at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic polygon allow to say about the presence of a defined relation between the RVA and strong earthquakes with a magnitude $M_w > 7.5$ in the northwestern framing of the Pacific Ocean [Firstov, 2014; Firstov, Makarov, 2018; Firstov et al., 2018]. The northwestern framing of the Pacific Ocean refers to the area where the interaction of the Eurasian (EUR), Pacific (PAC), and North American (NAM) three largest plates occurs (Fig. 1). These plates interaction is accompanied with intensive horizontal movements up to 9 mm/year, which result in strong earthquakes with $M_w = 7.5-9$ at depths from several to hundreds of kilometers. The studied area includes the Aleutian and Kuril-Kamchatka seismogenic zones, as well as the northern part of the Japan zone (Fig. 1).

This work summarizes the results of twenty years of observations of the RVA behavior in the informative point at the "Paratunka" control station. The authors believe the dynamics of the RVA in this point to reflect the stress-strain state of the key-block of the subduction zone region where the registration point is located.

Equipment and observational methods

Subsoil radon monitoring network at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic polygon (PKGP) involves five stations equipped with the subsoil gases registration complexes [Makarov et al., 2012]. Under the conditions of necessity to ensure continuous monitoring for a long time, the method of its registration in the subsoil air by the β -radiation of RaC and RaB decay products using gas-discharge counter appeared to be the most metrologically simple and reliable. Long-term registration of Rn in the subsoil air in the PKGP stations network has shown high functional reliability of applied equipment.

At the "Paratunka" control station (PRTR) (Fig. 1 b), one of the sensors was successfully installed in the moisture saturation zone with a heightened strain sensitivity to changes in the stress-strain state of the geological medium. The mechanism of reactions of the various geophysical fields, manifested under different disturbances of the stress-strain state of the medium, determines the strain sensitivity of a particular registration point. As usual, the structure position of strain-sensitive zones indicates their belonging to the mobile contacts of the large blocks [Kissin, 2011].

The PRTR station is located on the river terrace of the Korkin stream, which traces the sublatitudinal fault within the Paratunka graben with the associated geothermal system of the same name and situates in a zone of dynamic influence of this fault. Natural outcrops of geothermal waters with the dissolved Rn content up to 1.5 kBq/m³ are observed down the stream at a distance of ~ 700 m from the PRTR station. According to the data of GPR profiling, there is decompactification area immediately under the sensor [Firstov, Makarov, 2018]. The authors suppose, that the presence of a zone of dynamic influence of the fault as well as the decompactification area provides strain sensitivity of this point.

In this work, we used the RVA data obtained with the 30 min discretization from the sensor at a depth of ~ 3.5 m in the moisture saturation zone of the PRTR station. The RVA time series was barometrically compensated in order to minimize the influence of atmospheric pressure variations. Then a decimation was performed within a semidiurnal interval. In order to filter the highfrequency component, the last step of the data treatment was a moving average smoothing in a five-day window [Firstov, 2014; Firstov, Makarov, 2018]. The seasonal annual component conditioned by the seasonal variation in air temperature was being subtracted from the obtained RVA time series using the additive model [Box, Jenkins, 1974]. The course of the obtained curve was compared with the sequence of earth-quakes with $M_w > 7.5$ in the northwestern margin of the Pacific Ocean.

Strong earthquakes in the northwestern framing of the Pacific Ocean in 2000-2020

The sampling of the most powerful earthquakes in the northwestern framing of the Pacific Ocean in the period from 01.11.2000 to 01.04.2020 included 13 earthquakes with $M_w > 7.5$ and two with $M_w < 7.5$. The parameters of the selected earthquakes were taken from the NEIC (National Earthquake Information Center, USA, https://www.usgs.gov/ natural-hazards/earthquake-hazards/nationalearthquake-information-center-neic) catalogue. The Zhupanovo earthquake on January 30, 2016 with $M_w = 7.2$ and H = 177 km [Chebrov et

Table. The most powerful earthquakes in the northwestern framing of the Pacific Ocean for the period of 1.11.2000 – 01.04.2020

Mo	Data	Time,	Coordinates		II Irm	М	D 1	A map of the comthermality amigantan
JNG	Date	hh:mm:ss	φ° N	λ° Ε	п, кш	M _w	<i>х</i> , кш	Area of the earthquake epicenter
1	25.09.2003	19:50:27	41.81	143.91	27	8.3	1640	Japan, Hokkaido Island
2	17.11.2003	06:43:06	51.15	178.65	33	7.8	1420	Aleuts, Rat islands
3	20.04.2006	23:52:02	60.94	167.14	22	7.6	1035	Olutorsk, north of the Kamchatka Peninsula
4	15.11.2006	11:14:13	46.58	153.27	10	8.3	800	Middle Kurils, in the vicinity of
5	13.01.2007	04:23:21	46.23	154.55	10	8.1	800	Simushir Island
6	05.07.2008	02:12:04	53.88	152.89	632	7.7	370	The Sea of Okhotsk
7	11.03.2011	05:46:24	38.10	142.85	24	9.0	2050	Tohoku mega-earthquake
8	14.08.2012	02:59:38	49.80	145.06	583	7.7	980	The Sea of Okhotsk
9	24.05.2013	05:44:48	54.89	153.22	609	8.3	390	Okhotomorsk earthquake
10	23.06.2014	20:53:09	51.85	178.74	109	7.9	1400	Aleuts, Rat islands
11	30.01.2016	03:25:12	54.01	158.01	177	7.2	110	Zhupanovo earthquake
12	17.07.2017	23:34:13	54.17	168.82	82	7.7	710	Near Islands Aleutian earthquake
13	23.01.2018	9:31:40	56.01	149.17	14	7.9	3350	Alaska area
14	20.12.2018	17:01:55	55.10	164.70	17	7.3	490	Uglovoye Podnyatiye earthquake
15	25.03.2020	2:49:21	48.99	157.69	57	7.5	440	North Kurils, opposite to Paramushir Island

Note. H – focal depth, M_w – magnitude, R – distance from epicenter to the PRTR. The earthquakes of the Kuril-Kamchatka seismogenic zone are highlighted in grey.





Figure 1. Map of the epicenters of the most powerful earthquakes with $M_w > 7.5$ in the northwestern margin of the Pacific Ocean for 2000–2020 with the addition of the Zhupanovo earthquake $(M_w = 7.2)$ and the Uglovoye Podnyatiye earth-

quake ($M_w = 7.3$). On the right is a location scheme of subsoil radon control stations on the Kamchatka Peninsula: 1 – RVA control stations (the INSR station is located in the other structure element of the coast of the Avacha Bay and not considered in this work); 2 – the largest faults; 3 – faults of the second order [Popruzhenko, Zubin, 1997]. The numbers of earthquakes correspond to the Table.

al., 2016], as well as the Uglovoye Podnyatiye earthquake on December 20, 2018 with $M_w = 7.3$ and H = 17 km in the junction zone of Kamchatka and Aleutian oceanic trenches [Chebrov et al., 2020] were added in the sampling due to the focus proximity to the PRTR station (110 km). The parameters of the selected earthquakes are given in the table, and their epicenters map is shown in Figure 1. The map has been prepared based on the GoogleMaps data from the open sources using the MapInfo software and the digital topographic base on a scale of 1 : 1 000 000.

Our sampling contains 9 earthquakes of the Kuril-Kamchatka seismogenic zone: 6 with H < 180 km and 3 purely subduction earthquakes with H > 500 km (highlighted in red on the map in Figure 1), 4 events in the Aleutian seismogenic zone, and 2 in the area of the Japanese Archipelago including the Tohoku mega-earthquake with $M_w = 9.0$.

Subsoil radon dynamics in the moisture saturation zone of the PRTR station

Let us consider the features of the subsoil radon dynamics with respect to the earthquakes from our sampling (Fig. 2). The average value of the RVA was 8.21 ± 1.07 kBq/m³ for the whole observation period. Against this background, some trends can be distinguished in the RVA behavior, when the RVA value has smoothly increased by ~ 33 % followed by a sharp decrease by 30 % or more (Fig. 2). Such periods duration ranged from 8 months to 3 years.

From July 2003 to December 2005, the curve showed the trend I of the RVA increase up to 20 %, followed by a sharp bay drop of the values by 30 % lower than the initial values. The bay duration amounted for almost 1.5 years. Just after the drop of the RVA values, the seismic activation period including the chain of 3 earthquakes with magnitudes $M_{\rm w} = 7.6-8.3$ has begun in the area of Kuril-Kamchatka seismogenic zone. In the Koryak Highlands on the north of Kamchatka, the Olutorsk earthquake (no. 3, see the Table) with $M_{\rm w} = 7.6$ occurred on April 20, 2006, and then the duplet of Simushir earthquakes with $M_{\rm w} = 8.3$ and $M_{\rm w} = 8.1$ (no. 4 and 5, see the Table) occurred in the Middle Kurils on November 15, 2006 and January 13, 2007, respectively (Fig. 1 and 2).

The preparation of the earthquake on September 25, 2003 with $M_{\rm w} = 8.1$ in the vicinity



The material is available under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY. 4.0) of Hokkaido Island was not reflected in the RVA data, however, prior to the Tohoku mega-earthquake with $M_w = 9.0$, which occurred in Japan on March 11, 2011 at a distance of 2100 km from the registration point (no. 7 from the Table), the weak trend **II** of the RVA values increase was being observed, which had begun in March 2010 and lasted for 8 months until November 2010 (Fig. 2).

For almost three years, from January 2012 to February 2015, the trend III, when the RVA increased by 33 % from 7.5 up to 10 kBq/m³, was being observed (Fig. 2). During this period, three earthquakes (no. 8, 9, 10, see the Table) occurred, the response to which was not observed in the RVA dynamics. The authors believe it to be explained by the fact that no. 8, 9 earthquakes are deep with H > 500 km, and no. 10 earthquake has occurred in the Aleutian seismogenic zone at a considerable distance from the observation point (1400 km).

Based upon the behavior of the trend III of the RVA, similar to the trend I, the mid-term forecast was made for the occurrence in the coming years of one or a series of strong earthquakes at depths up to 70 km in the northwestern margin of the Pacific Ocean, including its water area adjacent to the Kamchatka Peninsula. This forecast was published in the works [Firstov, 2014; Firstov, Makarov, 2015], and was also reported to the Kamchatka Branch of Russian Expert Council on earthquake prediction and assessment of seismic hazard. The authors consider the Zhupanovo earthquake (no. 11 from the Table) with $M_{\rm w} = 7.2$ and focal depth H = 177 km, which occurred on January 30, 2016, as a partial forecast realization [Firstov et al., 2017].

Since October 2016, the trend IV intermittent and complicated with short duration decrease of the RVA (Fig. 2) has begun. After twoyear increasing of the RVA from 7 to 10 kBq/m³, the sharp drop of the RVA down to the initial values was being observed for 2 months (September–November 2017). In the vicinity of this drop, the Near Aleutian earthquake with $M_w = 7.7$ (no. 12) occurred on July 17, 2017, which was one of the most powerful backarc shallow-focus earthquakes under the Bering Sea. Its epicentral aftershocks zone is estimated of ~ 500 km, that 3–5 times greater than the linear dimensions of the source of the earthquakes with a magnitude of 7.7-7.8 [Chebrov et al., 2017]. The no. 13 earthquake with $M_{\rm w} = 7.9$, which had occurred at a distance of 3350 km, did not elicit a response in the dynamics of subsoil radon. The RVA values continued to grow after that. The RVA reached its maximum value of 12 kBq/m³ for the entire observation period to December 2018, after which the sharp decrease had begun. The Uglovoye Podnyatiye earthquake with $M_{\rm w} = 7.3$ occurred close to this time [Chebrov et al., 2020]. After a five-months break, the RVA has begun to decrease again, and at present time it has a minimum value of 5 kBq/m^3 for the entire observation period.

The linear dependence of RVA $(Bq/m^3) = f(t)$ (day), has been computed by the less square method for the I, II, and III trends. All three dependences (1)–(3) approximating the trends are very similar to each other:

I RVA $(Bq/m^3) = 0.0026 \cdot t (day) - 100.11$, (1) III RVA $(Bq/m^3) = 0.0027 \cdot t (day) - 100.64$, (2) IV RVA $(Bq/m^3) = 0.0022 \cdot t (day) - 86.79$. (3)



Figure 3. The relationship between magnitude and distance from the observation point to the epicenter of the considered sampling of earthquakes with $M_w > 7.5$ with addition of the Zhupanovo and the Uglovoye Podnyatiye earthquakes. The earthquakes, the preparation of which was reflected in the field of subsoil radon, are marked with red circles, the field (in M_w –R coordinates) of the response of subsoil radon to strong earthquakes in the region is highlighted in yellow. The numbers correspond to the earthquakes in the Table.

Similarity of the linear dependences (1)–(3) testifies to the unified process occurring in a zone of the Paratunka graben prior to the strong earthquakes in the northwestern framing of the Pacific Ocean with the epicenters at a distance up to 1000 km from the PRTR control station.

Let us consider the dependence of precursors manifestation in the field of subsoil radon on epicentral distance for the earthquakes with $M_w > 7.5$ according to the table. The Figure 3 shows the field bounded with no. 11, 4, 3, 14 earthquakes. This field contains all the earthquakes occurred after the marked trends (see Fig. 2).

Based upon Figure 3, the following conclusions can be made.

1. Preparation of earthquakes with $M_w > 7.5$, and, in some cases, of less magnitude, which have occurred at a distance up to 1000 km from the PRTR control station having focal depth H < 200 km (no. 3, 4, 5, 11, 12, 14, 15), reflects in the dynamics of subsoil radon in a zone of complete moisture saturation.

2. Preparation of strong deep $(M_{w} > 7.7, H > 500 \text{ km})$ subduction earthquakes (no. 6, 8, 9) has not clear manifestation in the dynamics of subsoil radon.

3. For strong events occurred at distances of more than 1000 km from the PRTR control station, no precursor trends are also observed. Even the Tohoku mega-earthquake preparation with $M_w = 9.0$ (no. 7) has very weakly reflected in the field of subsoil radon.

Conclusion

The results of RVA monitoring during 2000–2020 on the Kamchatka Peninsula at the "Paratunka" (PRTR) control station obtained using the method of passive detection in accumulative chamber have shown the following. The preparation of earthquakes at the northwestern framing of the Pacific Ocean with a source depth H < 200 km and $M_w > 7.5$, and of a lower magnitude in some cases, which have occurred at the

distances up to 1000 km from the PRTR, is reflected in the dynamics of radon volume activity (RVA). Four periods lasting from 8 months to 3 years, when RVA values had gradually increased by ~33 % followed by sharp drop by ~ 30 % and more were identified. The trends of the I and III periods have preceded the earthquakes with $M_{\rm w} = 7.2 - 8.1$ at the distance up to 1000 km from the PRTR in the area, which belongs to the northwestern framing of the Pacific Ocean. The trend IV with a duration of \sim 3 years (2016–2018) has the largest values of RVA at its maximum, and a decrease in RVA values to the minimum over the entire observation period has been recorded in the last two years. It should be added that similar behavior of RVA dynamics was observed at the INSR station (Fig. 1), which is located in the other structure element of the Avacha Bay.

Based on the observed correlation between the trends in RVA dynamics and strong earthquakes, a possible strong earthquake can be predicted in the area of the Kamchatka Peninsula with great probability. It should be noted that two earthquakes, the Uglovoye Podnyatiye earthquake with $M_{\rm w} = 7.3$ (no. 14 in the Table) and the intraplate earthquake with $M_{\rm w} = 7.5$ (no. 15), have already occurred after the RVA values drop upon completion of the trend IV. However, the peculiarities of RVA dynamics point to a great probability of an earthquake with $M_{\rm w} > 7.5$ in the area of the Kamchatka Peninsula. Based upon the previous observations, the predicted earthquake should be expected until February 1, 2021. These data conform with the long-term prediction for the Kuril-Kamchatka seismogenic zone made in the works by S.A. Fedotov and A.V. Solomatin [2017, 2019]. According to this forecast, the highest probability of an earthquake with $M_{\rm w} \ge 7.7$ falls on the Avacha Bay and Southern Kamchatka. The intensity of such an earthquake in Petropavlovsk-Kamchatsky can be more than 7 points.

References

1. Adushkin V.V., Spivak A.A. **2014.** *Fizicheskie polia v pripoverkhnostnoi geofizike* [*Physical fields in near-surface geophysics*]. Moscow: GEOS, 349 p. (In Russ.).

2. Baykara O., İnceöz M., Doğru M., Aksoy E., Külahcı F. **2009.** Soil radon monitoring and anomalies in East Anatolian Fault System (Turkey). *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1(279): 159–164. https://doi.org/10.1007/s10967-007-7211-2 3. Biryulin S.V., Kozlova I.A., Yurkov A.K. **2019**. Investigation of informative value of radon volume activity in soil during both the stress build-up and tectonic earthquakes in the South Kuril region. *Vestnik KRAUNTS*. *Nauki o Zemle = Bulletin of KRAESC*. *Earth Sciences*, 4(44): 73–83.

https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-73-83 (In Russ.).

4. Box G., Jenkins G. **1974.** *Analiz vremennykh riadov. Prognoz i upravlenie* [*Time series analysis. Fore-casting and control*]. Moscow: Mir, 406 p. (In Russ.).

5. Chebrov V.N., Kugaenko Yu.A., Abubakirov I.R., Droznina S.Ya., Ivanova E.I., Matveenko E.A., Mityushkina S.V., Ototyuk D.A., Pavlov V.M., Raevskaya A.A. et al. **2016**. The January 30, 2016 earthquake with Ks = 15.7, Mw = 7.2, I = 6 in the Zhupanovsky region (Kamchatka). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* = *Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*, 1(29): 5–16. (In Russ.).

6. Chebrov D.V., Kugaenko Yu.A., Abubakirov I.R., Lander A.V., Pavlov V.M., Saltykov V.A., Titkov N.N. **2017.** The July 17, 2017 Near-Aleutian earthquake with Mw = 7.8 on the border of the Komandor seismic gap (western part of the Aleutian Arc). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*, 3(35): 22–25. (In Russ.).

7. Chebrov D.V., Kugaenko Yu.A., Lander A.V., Abubakirov I.R., Droznina S.Ya., Mityushkina S.V., Pavlov V.M., Saltykov V.A., Serafimova Yu.K., Titkov N.N. **2020.** The Uglovoye Podnyatiye earthquake on December 20, 2018 (Mw = 7.3) in the junction zone between Kamchatka and Aleutian oceanic trenches. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*, 1(45): 100–117. (In Russ.). https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-1-45-100-117

8. Cicerone R.D., Ebel J.E., Beitton J.A. **2009.** Systematic compilation of earthquake precursors. *Tec-tonophysics*, 476: 371–396. doi:10.1016/j.tecto.2009.06.008

9. Fedotov S.A., Solomatin A.V. **2017.** The long-term earthquake prediction for the Kuril-Kamchatka island arc for the April 2016 through March 2021 period, its modification and application; the Kuril-Kamchatka seismicity before and after the May 24, 2013, M 8.3 deep-focus earthquake in the Sea of Okhotsk. *J. of Volcanology and Seismology*, 11(3): 173–186. https://doi.org/10.1134/s0742046317030022

10. Fedotov S.A., Solomatin A.V. **2019.** Long-term earthquake prediction (LTEP) for the Kuril–Kamchatka island arc, June 2019 to May 2024; properties of preceding seismicity from January 2017 to May 2019. Development and Practical Application of the LTEP Method. *J. of Volcanology and seismology*, 6: 6–22. https://doi.org/10.31857/s0203-0306201966-22.

11. Firstov P.P. **2014.** Forecasting of large earthquakes based on radon monitoring in the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamical testing area. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*, 1(23): 35–49. (In Russ.).

12. Firstov P.P., Makarov E.O. **2015.** Reaction of radon in soil and groundwater to stress-strain state of the Earth's crust. *Seismicheskie pribory* = *Seismic Instruments*, 51(4): 58–80. (In Russ.).

13. Firstov P.P., Makarov E.O. **2018.** *Dinamika podpochvennogo radona na Kamchatke i sil'nye zemletriaseniia* [*Dynamics of subsoil radon in Kamchatka and strong earthquakes*]. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamGU n.a. Vitus Bering, 148 p. (In Russ.).

14. Firstov P.P., Makarov E.O., Glukhova I.P. **2017.** Peculiarities of subsoil gas dynamics before the M = 7.2 Zhupanovo earthquake on January 30, 2016, Kamchatka. *Doklady Akademii nauk* = *Doklady Earth Sciences*, 472: 196–199. https://doi.org/10.1134/s1028334x17020015

15. Firstov P.P., Makarov E.O., Glukhova I.P., Budilov D.I., Isakevich D.V. **2018.** Search for predictive anomalies of strong earthquakes according to the monitoring of subsoil gases at Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic test site. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2(1): 16–32. (In Russ.). doi:10.30730/2541-8912.2018.2.1.016-032

16. Immè G., Morelli D. **2012.** Radon as earthquake precursor. In: D'Amico S. (ed.) *Earthquake research and analysis – statistical studies, observations and planning*, 143–160. https://doi.org/10.5772/29917

17. Iwata D., Nagahama H., Muto J., Yasuoka Y. **2018.** Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes. *Scientific Reports*, 8(13028). https://doi.org/10.1038/s41598-018-31341-5

18. İnan S., Akgu T., Cemil S. **2008.** Geochemical monitoring in the Marmara region (NW Turkey): A search for precursors of seismic activity. *J. of Geophysical Research*, 113: B03401. https://doi.org/10.1029/2007JB005206

19. Kissin I.G. **2011.** Strain sensitivity in fluid-saturated media. *J. of Volcanology and Seismology*, 5(3): 179–189. doi:10.1134/S0742046311030055.

20. Majumdar K. **2004.** A study of fluctuation in radon concentration behavior as an earthquake precursor. *Current science*, 9(86): 1288–1292.

21. Parovik R.I. **2014.** *Matematicheskie modeli klassicheskoi teorii emanatsionnogo metoda* [*Mathematical models of the classical theory of emanation method*]. Petropavlovsk-Kamchatskiy: KamGU n.a. Vitus Bering, 128 p. (In Russ.).

22. Petraki E., Nikolopoulos D., Panagiotaras D., Cantzos D., Yannakopoulos P., Nomicos C., Stonham J. **2015**. Radon-222: A potential short-term earthquake precursor. *J. of Earth Science and Climatic Change*, 6(6): 000282. doi:10.4172/2157-7617.1000282

23. Piersanti A., Cannelli V., Galli G. **2016.** The Pollino 2012 seismic sequence: clues from continuous radon monitoring. *Solid Earth*, 7: 1303–1316. https://doi.org/10.5194/se-7-1303-2016

24. Popruzhenko S.V., Zubin M.I. **1997.** Tectonics and seismicity of shelf in the gulf of Avacha and adjacent areas. *J. of Volcanology and Seismology*, 19(2): 211–219.

25. Rudakov V.P. **2009.** *Emanatsionnyi monitoring geosred i protsessov [Emanation monitoring of geomedia and processes]*. Moscow: Nauchnyi mir [Scientific world], 175 p. (In Russ.).

26. Tsunomori F., Tanaka H., Murakami M., Tasaka S. **2011.** Seismic response of dissolved gas in groundwater. In: *Proceedings of the 10th Taiwan-Japan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, October 25, Taiwan, National Cheng Kung University.* Tainan, 29–35.

27. Wakita H. **1981.** Precursory changes in ground water prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake. *Earthquake Prediction: An Intern. Review*, 4: 527–532. https://doi.org/10.1029/ME004p0527

About Authors

FIRSTOV Pavel Pavlovich (ORCID 0000-0003-1658-5165, ResearcherID AAC-5308-2020), Dr. sci. (Physics & Mathematics), head of Department of radon and acoustic monitoring, Federal Research Centre «United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences» (FRC UGS RAS), Kamchatka Branch, Petropavlovsk-Kamchatsky, firstov@emsd.ru MAKAROV Evgeniy Olegovich (ORCID 0000-0002-0462-3657, ResearcherID AAL-1711-2020), Cand. sci. (Physics & Mathematics), senior researcher, Federal Research Centre «United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences» (FRC UGS RAS), Kamchatka Branch; head of laboratory, Kamchatka State University named after Vitus Bering (KSU named after Vitus Bering), Petropavlovsk-Kamchatsky, ice@emsd.ru

УДК 550.831.23

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.288-296

Исследование палеовреза с помощью гравиметрических наблюдений

© 2020 Л. М. Буданов¹, Н. П. Сенчина^{*2}, О. М. Шнюкова², Г. Д. Горелик²

¹Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург, Россия, ²Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,

*E-mail: n_senchina@inbox.ru

Резюме. Задача изучения палеодолин актуальна для территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области из-за слабой устойчивости грунтов и высокого риска нарушения инженерных конструкций в районах развития указанных структур. Кроме того, палеодолины региона являются источником возобновляемых запасов питьевой воды за счет значительной мощности рыхлых отложений, выполняющих врезы. Картирование и оценка мощности коллектора могут быть полезны при выборе и мониторинге в процессе эксплуатации источников водоснабжения ближайших населенных пунктов (г. Сестрорецк, пос. Солнечное Ленинградской области и др.). Поскольку плотность вмещающих пород выше, чем выполняющих врезы отложений, палеодолины представляют собой участки с относительно увеличенной мощностью малоплотных отложений, над которыми ожидаются отрицательные гравиметрические аномалии. Выполнены наблюдения вдоль одного профиля, секущего предполагаемое расположение исследуемого вреза. Исследование проведено с помощью высокоточного гравиметра CG-5 Autograv с геодезическим сопровождением. Работы продемонстрировали эффективность гравиразведки при решении поставленной задачи, а также показали пользу проведения площадных гравиметрических наблюдений и комплексирования с малоглубинными сейсмическими исследованиями. Аномалия над врезом составила примерно 1 мГал, результаты показали наличие тектонического нарушения под палеоврезом, с вертикальным смещением в нижележащих отложениях, которое не наследуется современным рельефом. Наблюдения, обработка и интерпретация данных выполнены при участии студентов Санкт-Петербургского горного университета в рамках факультативных занятий.

Ключевые слова: гравиметр, гравиразведка, редукция Буге, гравитационное поле, палеорусло, палеодолина, инженерная геофизика, Финский залив, Ленинградская область, ледниковые отложения

Для цитирования: Буданов Л.М., Сенчина Н.П., Шнюкова О.М., Горелик Г.Д. Исследование палеовреза с помощью гравиметрических наблюдений. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 3, с. 288–296. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.288-296

For citation: Budanov L.M., Senchina N.P., Shnyukova O.M., Gorelik G.D. Study of paleochannels by means of gravimetric observations. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 288–296. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.288-296

Study of paleochannels by means of gravimetric observations

Leonid M. Budanov¹, Natalia P. Senchina^{*2}, Olga M. Shnyukova², Gleb D. Gorelik²

¹A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia ²Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia *E-mail: n senchina@inbox.ru

Abstract. Investigation of ancient river valleys – paleochannels – is of particular relevance for the territory of St. Petersburg and the Leningrad region due to a poor stability of rocky soils here and the subsequent high risk of structural damage during the construction of multi-storey buildings. In addition, paleochannels in the region constitute a source of renewable drinking water owing to a significant capacity of sandy sediments. The mapping and estimation of the capacity of such reservoirs may be useful for the selection and monitoring during operation of water sources feeding the nearest settlements (Sestroretsk, Solnechnoye, etc.). Since the density of the enclosing rocks is higher than that of incising sediments, paleochannels

constitute areas having a relatively high thickness of low-density sediments, over which negative gravimetric anomalies can be expected. At the first stage of the study, observations along a single profile crossing the assumed position of the paleochannel under study were performed. The study was conducted using a highprecision gravimeter Autograv CG-5 with geodesic tracking. The research confirmed the efficiency of gravity survey for solving the research tasks, as well as for performing areal gravimetric observations combined with shallow seismic surveys. The anomaly above the incision under study was approximately 1 mGa. The study revealed the presence of tectonic disruptions under the paleochannel, vertically displaced respective to the underlying sediments not inherited by the modern relief. Observations, processing and interpretation of the data were performed with the participation of students from the St. Petersburg Mining University in the framework of elective classes.

Keywords: gravimeter, gravity survey, Bouguer reduction, gravitational field, paleo-bed, paleo-valley, engineering geophysics, Gulf of Finland, Leningrad region, glacial deposits

Благодарности и финансирование

Авторы благодарят И.В. Лыгина, доцента кафедры геофизических методов исследования земной коры МГУ имени М.В. Ломоносова, за советы по улучшению статьи; Н.О. Медведева, инженера гравиметрической партии Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского, за активное участие в полевом этапе работ.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 19-35-50072, «Выявление палеодолин в современных береговых зонах российских секторов Балтийского моря»).

Введение

Для геологического строения северной Европы характерно наличие сложной системы погребенных плиоцен-плейстоценовых врезов [Геологический атлас..., 2009]. Исследования, направленные на изучение системы палеодолин, ведутся с начала XX в., когда было установлено их существование. На сегодняшний день накоплен значительный объем данных, полученных как на суше [Дашко и др., 2011; Jørgensen, Sandersen, 2008; Kirsch et al., 2006], так и на акваториях морей [Спиридонов, 2010; Mads, Lykke-Andersen, 2000; Velegrakis et al., 2010].

Высокий интерес к погребенным долинам связан с их геологическими особенностями. Информация о строении погребенных долин отражает условия седиментации в ледниковые и межледниковые периоды и может быть использована для палеореконструкций. Помимо этого палеодолины являются коллекторами подземных вод, которые представляют все больший интерес для водоснабжения. Причиной интереса служит то, что воды в них могут быть лучше защищены от загрязнения, чем приповерхностные водоносные горизонты [Kirsch et al., 2006].

В Санкт-Петербурге и Ленинградской области в настоящее время продолжают активно осваиваться общирные территории,

возводятся промышленные и жилые сооружения, в том числе высотные, прокладываются коммуникации и т.д. Палеодолины, в связи с высокой мощностью менее устойчивых четвертичных отложений, создают потенциально высокий геологический риск при строительстве многоквартирных домов сплошной застройки, объектов инженерной и транспортной инфраструктуры, магистралей городского и районного значения и т.д. (рис. 1 а). Слабая устойчивость грунтов в районе их развития может привести к нарушению целостности построек из-за увеличения нагрузки на геологическую среду [Дашко и др., 2011]. В зоне расположения погребенных долин фиксируется высокое положение уровня грунтовых вод, поэтому при строительстве необходимо принимать во внимание интенсивность их воздействия на материал фундамента [Дашко и др., 2011]. Палеоврезы являются неблагоприятным фактором при освоении подземного пространства, поэтому их наличие нужно учитывать при строительстве подземных линий метрополитена и коллекторных тоннелей, которые рекомендуется прокладывать в дочетвертичных отложениях, ниже самой глубокой части палеодолин – тальвега. В связи с этим анализ распространения и состояния древних погребенных врезов имеет большое инженерно-геологическое, гидрогеологическое и экологическое значение.

На территории города и в акватории Невской губы погребенные долины являются врезами в дочетвертичных породах вендского (в центральной и северной части рассматриваемого района) или кембрийского (на юге) возраста, которые выполнены и перекрыты четвертичными отложениями (рис. 1 b). Палеодолины характеризуются значительной глубиной вреза – до 100 м при ширине до 1-2 км, крутизна склонов относительно невелика и изменяется обычно в пределах 12-15°, реже 18°, в верхней части – менее 10° [Николаева, Норова, 2012]. В четвертичной толще в пределах долин выделяют до трех ледниковых и межледниковых комплексов, встречающихся на территории города. Моренные толщи представлены преимущественно суглинками с гравием, галькой и валунами, являющимися водоупором. Межморенные водоносные образования представлены песками, супесями, песками с гравием и галькой [Буданов и др., 2017].

Показанные на рис. 1 b палеодолины прослежены преимущественно с помощью анализа данных бурения скважин, что является дорогостоящим способом изучения недр. Бурение производится по неравномерной сети. В данной работе рассматривается возможность картирования погребенных врезов на территориях, слабо изученных бурением, а также перспективы более детального рассмотрения внутренней структуры объектов с помощью гравиразведки с привлечением других геофизических методов исследования.

В качестве полигона для опытно-методических работ выбран пляж на берегу Финского залива вблизи г. Сестрорецк (рис. 1 с) ввиду транспортной доступности, благоприятных



Рис. 1. Схемы мощности четвертичных образований (а) и расположения палеодолин (b) в пределах Санкт-Петербурга. Профиль гравиметрических наблюдений (c) (с использованием [Геологический атлас..., 2009; Ядута, 2006; Climate Proof...]).

Figure 1. The schemes of the Quaternary sediments (a), and the paleovalleys location within the territory of St. Petersburg (b). Gravimetric observations stations (c) (using [Geological Atlas..., 2009; Yaduta, 2006; Climate Proof...]). Paleovalleys are shown with an orange line.

природных условий, пологого рельефа и ожидаемой на основе геологических сведений выраженности палеовреза в физических полях.

Обоснование выбора методики работ

По данным многочисленных скважин. пробуренных в Ленинградской области [Дашко и др., 2011], плотность рыхлых четвертичных отложений, выполняющих врезы палеодолин рассматриваемого региона, меньше плотности коренных отложений. Плотность ледниковых, отложений межледниковых и послеледниковых комплексов варьирует в пределах от 1.76 до 2.27 г/см³, а вендских глин, поверхность которых осложнена врезами, – от 2.67 до 2.76 г/см³ (см. таблицу). Мощность четвертичной толщи вне палеодолин варьирует незначительно – от 20 до 45 м, а в тальвегах погребенных долин достигает 150 м. Увеличение мощности рыхлых четвертичных отложений, а также возможное наличие тектонически ослабленных пород в основании вреза [Ауслендер, 2002; Дашко и др., 2011; Ядута, 2006] приводит к отрицательной избыточной плотности в типовом разрезе палеодолин, которая проявляется в виде отрицательной аномалии в поле силы тяжести. Успешное применение высокоточной гравиразведки в исследованиях, направленных на изучение палеодолин, подтверждает эффективность метода не только при локализации врезов, но и в уточнении характера его заполнения [Малов, 1999; Mads, Lykke-Andersen, 2000].

Для оценки информативности метода при изучении палеодолин выполнено компьютер-

Таблица. Плотность и состав отложений, слагающих разрез

Table.	Density	and	com	position	of	sediments

N₂	Состав отложений*	ρ, г/см ³
1	Суглинки (гляциальные)	2.02-2.27
2	Пески/супеси	1.70-1.95
3	Глины	2.17-2.26
4	Песчаник	2.25-2.60

* Отложения со схожим литологическим составом и физическими свойствами в пределах палеодолины могут встречаться в комплексах различных возрастов, поэтому они сгруппированы по преимущественному составу, не по возрасту. Коренные отложения – глины и песчаники – относятся к котлинскому горизонту венда.

*Sediments with similar lithological composition and physical properties within the area of paleovalley can occur in the complexes of different ages, so they are grouped by their predominant composition, not by age. The bedrock sediments – clay and sandstones – belong to the Vendian Kotlin horizon. ное моделирование – решение прямой задачи гравиразведки для типового разреза палеорусла, характерного для региона. В целях оценки геологической обстановки и выбора оптимального варианта проведения полевых работ составлена по априорным данным модель изучаемого объекта – двумерный плотностной разрез (рис. 2).

Объектом моделирования выступает палеорусло, заполненное переслаивающимися суглинками, песками и супесями, с углами склонов около 10°. Вмещающие породы представлены характерными для района вендскими глинами. Для моделирования использовались такие априорные сведения, как скважинные колонки, на которых указаны границы горизонтов, сведения о геологическом строении района на региональном уровне, определенные по керну значения плотностей слагающих разрез пород и т.д. В совокупности все эти сведения помогли оценить пространственные и петрофизические характеристики модели. Сеть наблюдений, используемая при моделировании, была выбрана в соответствии со съемкой масштаба 1:25 000 согласно изданной в 1975 г. «Инструкции по гравиметрической разведке» Всесоюзного научно-исследовательского института геофизических методов разведки (http://www.geokniga.org/books/48). Такой выбор обусловлен геометрическими размерами изучаемого объекта: глубина вреза в дочетвертичной толще до 100 м при ширине до 1-2 км. Шаг наблюдений при моделировании составлял 50 м. Моделирование показало, что указанный шаг съемки приемлем для выделения палеорусла и количественной интерпретации параметров аномалеобразующего объекта (см. рис. 2).

Дополнительно проведено изучение магнитного поля для выделения возможного тектонического нарушения, залегающего в основании вреза. Использовался протонный магнитометр GSM-19T. При наличии режима непрерывной съемки с автоматической GPS-привязкой («walking mode») вопрос о шаге наблюдений не стоял (https:// userpage.fu-berlin.de/geodyn/instruments/ Manual_GEM_GSM-19.pdf). Обработка данных, включавшая введение поправки за вариации магнитного поля, проведена в модуле MagBase в программном пакете Oasis Montaj.



Рис. 2. Априорная физико-геологическая модель и гравитационное поле, рассчитанное по модели по-гребенной долины. 1 – суглинки (гляциальные), 2 – пески/супеси, 3 – глины, 4 – песчаник.

Figure 2. A-priori physical-geological model and gravitational field computed according to the model of the buried valley. 1 -glacial loams, 2 -sands/sandy loams, 3 -clays, 4 -sandstone.

Основными трудностями в применении метода являлись наличие на берегу металлических конструкций и отсутствие информации о магнитных свойствах слагающих разрез пород, ввиду чего метод имел подчиненное значение.

Методика полевых гравиметрических исследований и обработки материалов

Гравиметрическая съемка выполнялась с использованием современного автоматического микропроцессорного гравиметра CG-5 Autograv (Scintrex Ltd, Канада) по профилю, расположенному вдоль уреза воды по берегу Финского залива в районе нахождения палеодолины (рис. 1 с). Расположение точек наблюдения на профиле, параллельном береговой линии в пределах пляжа, на котором отсутствуют значительные перепады высот, позволило минимизировать влияние окружающего рельефа на регистрируемые данные. Шаг наблюдений составлял 50 м в центральной части профиля (над предполагаемым расположением тальвега и склоновых участков погребенной долины) и 100 м на его периферии.

Съемка и подготовка оборудования к работе проводились в соответствии с инструкцией CG-5 Manual (https://scintrexltd.com/wpcontent/uploads/2017/02/CG-5-Manual-Ver_8. pdf). На рядовых пунктах гравиметрических наблюдений измерения производились в режиме – три цикла продолжительностью по 30 с, выполнялся оперативный контроль качества наблюдений.

При реализации гравиметрической съемки для учета остаточного дрейфа нуля выбирался локальный опорный гравиметрический пункт (ОГП), длительность рейсов не превышала 2 ч для обеспечения микрогальной точности. Работы проводились с условным уровнем наблюдаемых величин, без приведения к абсолютным значениям гравитационного поля. Режим наблюдений на ОГП – девять циклов измерений продолжительностью по 30 с.

Каждое звено съемки проконтролировано путем выполнения повторных измерений на рядовых гравиметрических пунктах. Среднеквадратичное отклонение по результатам оценки измерений на контрольных точках составляет 9 мкГал.

Топогеодезическое обеспечение (привязка точек наблюдений) осуществлялось с использованием портативного GPS/ГЛОНАССнавигатора, а изменение альтитуд рельефа на профиле фиксировалось нивелирной съемкой. Погрешность измерений по вертикали составляла 0.5 см, а перепад высот по результатам измерений не превышал 2 м.

Обработка полевых материалов выполнялась в программном пакете Oasis Montai от Geosoft Inc, Канада (https://www.academia. edu/18154231/montaj Gravity and Terrain Correction). В данные были внесены следующие поправки: приливно-отливные (лунно-солнечные) вариации, дрейф нуля (остаточный), за высоту точки наблюдения и промежуточный слой. В определении аномальной составляющей поля, обусловленной плотностной неоднородностью разреза, учтено изменение нормального гравитационного поля с широтой расположения точки наблюдения.

Результаты и обсуждение

Первичная интерпретация проводилась без привлечения данных других методов и показала неограниченную вариативность моделей, удовлетворяющих наблюденному полю и известным данным о значениях плотностей пород. Это связано с неоднозначностью решения обратной задачи гравиразведки. Однако все они свидетельствуют об отрицательной эффективной плотности отложений, выполняющих врез.

В связи с этим для интерпретации были привлечены данные сейсмических исследований. Результаты сейсмических исследований, полученные на факультативном занятии студентов Горного университета, проводимых под руководством авторов, позволили закрепить в плотностной модели некоторые однозначно интерпретируемые границы. Учитывая особенности геологического строения для палеодолин исследуемого региона, сейсмические границы и границы блоков плотностной модели соответствуют друг другу, так как в данных условиях границы, на которых происходит изменение акустической жесткости, и границы, на которых изменяются плотности, на физико-геологической модели палеодолины совпадают. Оптимальным способом изучения палеодолины представляется сочетание гравиметрических и сейсмических исследований вдоль одного профиля с их комплексной интерпретацией.

Так, по результатам комплексной интерпретации данных гравиразведки и сейсморазведки установлено, что крутизна склонов вреза изменяется в пределах от 8° до 12°, южный склон осложнен террасой, тальвег расположен на абсолютной глубинной отметке около 100 м и смещен по латерали от предполагаемого (по данным схемы, опубликованной в [Геологический атлас..., 2009]) положения в северном направлении более чем на 400 м, глубина вреза в дочетвертичных породах составляет около 50 м, а террасы палеодолины расположены на уровне около 70 м.

Дополнительное подтверждение наличия ступени возможно по данным магниторазведки – в средней части профиля поле претерпевает резкое изменение, что свидетельствует о вертикальном перепаде поверхности вендских глин вблизи разлома, контролирующего палеоврез. Представленные на рис. 4 данные были получены в результате непрерывной пешеходной съемки магнитного поля вдоль нескольких профилей. Выполнение работы в зимний период позволило пройти по льду, отдалившись от антропогенных аномалий, расположенных на берегу (ярко-розовый цвет на карте, рис. 4). Съемка проведена с учетом вариаций магнитного поля протонными магнитометрами GSM-19T.

Данные магниторазведки не позволяют выделить собственно долину, однако достоверно локализуют связанное с палеоврезом тектоническое нарушение по выраженной градиентной зоне.

По итогам этапа магнитной съемки, в данном регионе не представляется перспективным использование магниторазведки



Рис. 3. Результат гравитационного моделирования по изученному профилю. В верхней части рисунка: точки – измеренные значения, черная линия – подобранное (модельное) поле (поле в редукции Буге с условным уровнем). Внизу показана двумерная плотностная модель. Врезка – фрагмент разреза, полученного по данным сейсморазведки в сопоставлении с границами плотностных блоков. Растяжение по вертикали в 2.5 раза.

Figure 3. The result of gravitational simulation along the studied profile. In the upper part of the figure: the points – measured values, the black line – model field (field in the Bouguer reduction with nominal level). Below a two-dimensional density model is shown. The inset at the right part of the picture – a fragment of the section obtained using the seismic data in comparison with the boundaries of the density blocks. Vertical spreading: 2.5.

для выделения врезов древних рек, однако объекты сопровождающего ряда, такие как разрывные нарушения, можно выделить по высокоградиентным зонам магнитного поля.

Анализируя проведенный цикл работ – грави-, магниторазведку, а также результаты сейсморазведки, можно отметить:

1) затраты времени на гравиразведку небольшие (1 полный день съемки), результат получен быстро, положение палеовреза локализовано точно. Применение рекомендовано, особенно на поисковом этапе;

2) затраты времени на магниторазведку небольшие (примерно 3 ч съемки), однако прямых признаков палеовреза не обнаруживается. Применение для картирования палеодолин не рекомендуется;

3) затраты времени на сейсморазведку значительные (большая группа операторов и помощников, 2 полнодневных выезда и относительно длительная обработка), палеоврез выделен однозначно и достоверно. Метод рекомендуется как заверяющий для сублинейных отрицательных аномалий, полученных по данным гравиметрии.



Рис. 4. Результат магнитной съемки (в том числе ледовой). **Figure 4.** The result of magnetic survey (including ice survey).

Заключение

По результатам выполненной работы установлены геометрические характеристики погребенной долины (глубина вреза, крутизна склонов) и плотностные параметры заполняющего врез материала. Уточнено положение тальвега: ожидаемое его положение по данным бурения оказалось на 400 м севернее предполагаемого изначально; установлено наличие террас палеодолины. Результаты показали наличие тектонического нарушения под палеоврезом.

Метод гравиметрии показал высокую эффективность в решении задачи картирования палеорусла. Аномалия над врезом составила примерно 1 мГал, что достаточно для обнаружения палеодолины с помощью гравиметрии. Однако для построения достоверного плотностного разреза и установления количественных характеристик аномалеобразующего объекта необходимо привлечение результатов структурных методов, например результатов сейсмических исследований.

Предполагается широкий интерес к направлению изучения палеодолин в береговых зонах окрестностей Санкт-Петербурга. Общественно-деловой комплекс «Лахта Центр», самый северный небоскреб в мире, находится вблизи палеовреза, что учтено в конструкции здания (фундамент установлен на сваи с глубиной заложения 82 м). Развитие района приведет к необходимости дальнейшего углубленного изучения особенностей погребенных долин прибрежной зоны. Для успешного применения гравиметрии в инженерно-геологических задачах требуется определение диапазона гравитационных аномалий, характерных для палеоврезов, в зависимости от литологических и геометрических их особенностей. Возможно ранжирование территорий по эффективности применения гравиметрии на основе изучения плотностного контраста вмещающих и заполняющих врез горных пород. Необходима разработка критериев выделения террас в крыльях вреза и тектонических нарушений в заложении тальвега на основе моделирования и множественных практических наблюдений.

Список литературы

1. Ауслендер В.Г., Яновский А.С., Кабаков Л.Г., Плешивцева Э.С. **2002.** Новое в геологии Санкт-Петербурга. *Минерал*, 1(4): 51–58.

2. Буданов Л.М., Глазунов В.В., Сергеев А.Ю., Кропачев Ю.П. **2017.** Картирование погребенных долин в пределах акватории озера Сестрорецкий Разлив по данным комплексных гидрогеофизических исследований. *Материалы 13-й конференции и выставки «Engineering Geophysics 2017»*. Кисловодск, 190–198.

3. Геологический атлас Санкт-Петербурга, 2009. Санкт-Петербург: Комильфо, 57 с.

4. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. **2011.** Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. *Развитие городов и геотехническое строительство*, 1: 1–47. http://www.urban-development.ru/2011/2.pdf

5. Малов Н.Д. 1999. О причинах аварии в Петербургском метро. Минерал, 2(3): 44–47.

6. Николаева Т.Н., Норова Л.П. **2012.** Инженерно-геологическая оценка особенностей строения древней долины на севере Санкт-Петербурга. *Грунтоведение*, 1: 44–52.

7. Спиридонов М.С. и др. **2010.** Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря. СПб.: ВСЕГЕИ, 78 с.

8. Ядута В.А. **2006.** Новейшая тектоника Санкт-Петербурга и Ленинградской области. *Минерал*, 1: 28–35.

9. Huuse M., Lykke-Andersen H. **2000.** Overdeeped Quatearnary valleys in the eastern Danish North Sea: morhpology and origin. *Quatearnary Science Reviews*, 19: 1233–1253.

https://doi.org/10.1016/s0277-3791(99)00103-1

10. *Climate Proof Living Environment*. URL: http://cliplive.infoeco.ru/index.php?id=34 (дата обращения: 05.05.2020).

11. Jørgensen F., Sandersen P.B.E. **2008.** Mapping of buried tunnel valleys in Denmark: new perspectives for the interpretation of the Quaternary succession. *Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS) Bulletin*, 15: 33–36. https://doi.org/10.34194/geusb.v15.5037

12. Reinhard K., Rumpel H.-M., Scheer W., Wiederhold H. **2006.** *Groundwater resources in buried valleys – a challenge for geosciences.* Hannover: Leibniz Inst. for Applied Geosciences (GGA-Institut), 299 p.

13. Velegrakis A.F., Ballay A., Poulos S., Radzevičius R., Bellec V.K., Manso F. **2010.** European marine aggregates resources: Origins, usage, prospecting and dredging techniques. *J. of Coastal Research, SI*, 51: 1–14.

References

1. Auslender V.G., Ianovskii A.S., Kabakov L.G., Pleshivtseva E.S. **2002.** Novoe v geologii Sankt-Peterburga [New in geology of Saint Petersburg]. *Mineral*, 1(4): 51–58. (In Russ.).

2. Budanov L.M., Glazunov V.V., Sergeev A.Yu., Kropachev Yu.P. **2017.** Kartirovanie pogrebennykh dolin v predelakh akvatorii ozera Sestroretskii Razliv po dannym kompleksnykh gidrogeofizicheskikh issledovanii [Mapping of the buried valleys within the water area of the Sestroretsky Lake Spill according to the data of complex hydrogeophysical studies]. In: *Materialy 13-i konferentsii i vystavki "Engineering Geophysics 2017"* [13th Conference and Exhibition "Engineering Geophysics 2017"]. Kislovodsk, 190–198. (In Russ.).

3. Geological Atlas of Saint Petersburg. 2009. St. Petersburg: Komilfo, 57 p. (In Russ.).

4. Dashko R.E., Aleksandrova O.Yu., Kotiukov P.V., Shidlovskaia A.V. **2011.** Osobennosti inzhenernogeologicheskikh uslovii Sankt-Peterburga [Features of geotechnical conditions of St. Petersburg]. In: [*Urban development and geotechnical construction*], 1: 1–47. (In Russ.). http://www.urban-development.ru/2011/2.pdf

5. Malov N.D. **1999.** O prichinakh avarii v Peterburgskom metro [About the causes of the accident in the St. Petersburg metro]. *Mineral*, 2(3): 44–47. (In Russ.).

6. Nikolaeva T.N., Norova L.P. **2012.** Inzhenerno-geologicheskaia otsenka osobennostei stroeniia drevnei doliny na severe Sankt-Peterburga [Engineering geological assessment of the features of the structure of the ancient valley in the north of St. Petersburg]. *Gruntovedenie* [Soil Science], 1: 44–52. (In Russ.).

7. Spiridonov M.S. et al. **2010.** Atlas geologicheskikh i ekologo-geologicheskikh kart Rossiiskogo sektora Baltiiskogo moria [Atlas of geological and ecological-geological maps of the Russian sector of the Baltic Sea]. St. Petersburg: VSEGEI, 78 p. (In Russ.).

8. Yaduta V.A. **2006.** Noveishaia tektonika Sankt-Peterburga i Leningradskoi oblasti [The latest tectonics of St. Petersburg and the Leningrad region]. *Mineral*, 1: 28–35. (In Russ.).

9. *Climate Proof Living Environment*. URL: http://cliplive.infoeco.ru/index.php?id=34 (accessed 05.05.2020).

10. Huuse M., Lykke-Andersen H. **2000.** Overdeeped Quatearnary valleys in the eastern Danish North Sea: morhpology and origin. *Quatearnary Science Reviews*, 19: 1233–1253. https://doi.org/10.1016/s0277-3791(99)00103-1

11. Jørgensen F., Sandersen P.B.E. **2008.** Mapping of buried tunnel valleys in Denmark: new perspectives for the interpretation of the Quaternary succession. *Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS) Bulletin*, 15: 33–36. https://doi.org/10.34194/geusb.v15.5037

Reinhard K., Rumpel H.-M., Scheer W., Wiederhold H. 2006. Groundwater resources in buried valleys – a challenge for geosciences. Hannover: Leibniz Inst. for Applied Geosciences (GGA-Institut), 299 p. 13. Velegrakis A.F., Ballay A., Poulos S., Radzevičius R., Bellec V.K., Manso F. 2010. European marine

aggregates resources: Origins, usage, prospecting and dredging techniques. J. of Coastal Research, SI, 51: 1-14.

Об авторах

БУДАНОВ Леонид Михайлович, кандидат географических наук, инженер, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург, Россия, vsegei@vsegei.ru СЕНЧИНА Наталия Петровна (ORCID 0000-0001-5458-648Х; ResearcherID E-3465-2014; Scopus ID 56401906000), кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, n senchina@inbox.ru

ШНЮКОВА Ольга Михайловна, студент, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, shnyu_olga@icloud.com

ГОРЕЛИК Глеб Дмитриевич (ORCID 0000-0002-9890-5275; ResearcherID Y-8429-2018; Scopus ID 57210743877), кандидат технических наук, старший преподаватель, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, gleb.gorelik@yandex.ru

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 550.388.2

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.297-304

Изменения полного электронного содержания ионосферы во время прохождения геомагнитной бури 31 августа – 3 сентября 2019 года по данным GPS

© 2020 А.А. Кирилов, В.Н. Сычев*

Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке, Киргизия *E-mail: sychev@gdirc.ru

Резюме. Рассмотрены изменения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы во время прохождения умеренной геомагнитной бури (Кр = 4–6), зарегистрированной 31 августа – 3 сентября 2019 г. Эта магнитная буря обладала самой большой в 2019 г. продолжительностью во времени. Для получения количественной оценки изменений, возникающих в ионосферном слое, проводился анализ вариаций угла наклона спектра мощности флуктуаций ПЭС по трассе распространения радиоволн от спутников GPS до приемной станции. В скользящем окне временной ряд ПЭС раскладывался в ряд Фурье и вычислялся тангенс угла наклона спектра мощности. В качестве исходной информации использовались первичные данные перманентной станции GPS POL2, которая входит в состав сети IGS. Станция находится на территории HC PAH, Бишкек, Киргизия, оснащена приемником Javad Delta-3, высокоточной антенной TPSCR.G3.

Ключевые слова: магнитная буря, ионосфера, GPS, полное электронное содержание, преобразование Фурье, спектр мощности

Для цитирования: Кирилов А.А., Сычев В.Н. Изменения полного электронного содержания ионосферы во время прохождения геомагнитной бури 31 августа – 3 сентября 2019 года по данным GPS. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 3, с. 297–304. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.297-304

For citation: Kirilov A.A., Sychev V.N. Changes in the total electron content of the ionosphere during a geomagnetic storm August 31 – September 3, 2019 according to GPS data. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 297–304. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.297-304

Changes in the total electron content of the ionosphere during a geomagnetic storm August 31 – September 3, 2019 according to GPS data

Artem A. Kirilov, Vladimir N. Sychev*

Research Station of Russian Academy of Sciences in Bishkek City, Bishkek, Kyrgyzstan *E-mail: sychev@gdirc.ru

Abstract. This article considers changes in the total electron content (TEC) in the ionosphere during a moderate geomagnetic storm (Kp = 4-6) recorded in Kyrgyzstan between August 31 and September 3, 2019. This geomagnetic storm was recognized to be the longest-lasting among those registered in 2019. In order to obtain a quantitative assessment of changes arising in the ionospheric layer during such geomagnetic events, variations in the slope of the power spectrum of TEC fluctuations along the propagation path of the radio waves from GPS satellites to the receiving station were analysed. Using a sliding window method, the TEC time series was expanded in a Fourier series, and the slope of the power spectrum was calculated. As initial information, primary data provided by the GPS POL2 permanent station, which is a part of the IGS network, on the territory of Research Station of the Russian Academy of Sciences located in Bishkek were used. This station is equipped with a Javad Delta-3 receiver and a TPSCR.G3 high-precision antenna.

Keywords: magnetic storm, ionosphere, GPS, total electronic content, Fourier transform, power spectrum

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке (тема № АААА-А19-119020190064-9).

Введение

Источником энергии большинства процессов, протекающих в атмосфере Земли, является излучение Солнца. По мере достижения заряженными частицами зоны действия земного магнитного поля они направляются этим полем к высокоширотным областям, вызывая возмущения электрического и магнитного полей, так называемые магнитные бури. В периоды сильных бурь возмущения распространяются и на средние широты, в большинстве случаев приводя к «отрицательным» возмущениям. Магнитные бури принято характеризовать следующими индексами: K, K_p, G [Lanyi, Roth, 1988].

К-индекс, введенный Дж. Бартельсом в 1938 г., характеризует отклонение магнитного поля Земли от нормы каждые 3 ч. Значения *К*-индексов определяются по данным 13 геомагнитных обсерваторий, объединенных в сеть, из которых 11 находятся в северном, а 2 – в южном полушарии. Значения *К*-индексов варьируют от 0 до 9 для каждого трехчасового интервала (0–3, 3–6, 6–9 и т.д.) мирового времени. Значение K = 0 соответствует спокойному магнитному полю, K = 9 – экстремально сильному возмущению.

Используемый в настоящей работе планетарный индекс $K_{\rm p}$ представляет собой среднюю величину K-индекса, взятого по данным геомагнитных обсерваторий. *G*-индекс определяется по 5-балльной шкале, характеризующей интенсивность магнитной бури по воздействию магнитного поля на электротехнику, связь, навигацию и т.д. По этой шкале магнитные бури подразделяются на уровни от G1 до G5. При этом установлено следующее соответствие между G- и K₋ индексом: G1 (слабая буря) – K_p = 5; G2 (умеренная) – K_p = 6; G3 (сильная) – K_p = 7; G4 (очень сильная) – K_p = 8; G5 (экстремально сильная) – K_p = 9.

Использование спутников GPS для изучения ионосферы при внешних воздействиях – быстро развивающееся направление в науках о Земле. Изменениям полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы при воздействиях различного рода как естественного, так и техногенного происхождения (землетрясения, солнечная и геомагнитная активность, грозы, цунами, взрывы и т.д.) посвящено много исследований [Афраймович, 2006; Гохберг и др., 2011; Pezzopane et al., 2019; Belakhovsky et al., 2017; Candido et al., 2018]. Первые публикации подобных исследований с использованием данных глобальных навигационных спутниковых систем появились почти сразу же после внедрения этих систем навигации [Lanyi, Roth, 1988]. Исследования с использованием такого вида данных при оценке флуктуаций ПЭС ионосферы как индикатора воздействий остаются актуальными и в настоящее время, так как воздействия можно трактовать как активные эксперименты и использовать для решения ряда задач физики ионосферной плазмы, распространения радиоволн, физики ударных волн и пр. [Афраймович, 2006].

Цель данной работы – исследование изменений ионосферы в период прохождения умеренной магнитной бури уровня G1 и G2, которая наблюдалась с 31 августа по 3 сентября 2019 г. Изменения в ионосфере оценивали по значениям полного электронного содержания, полученным по измерениям перманентной станции GPS POL2, которая входит в состав сети IGS. Станция находится на территории Научной станции РАН, оснащена приемником Javad Delta-3 и высокоточной антенной TPSCR.G3. Географические координаты станции: 74° 41' 39.37" N; 42° 40' 47.17" Е [IGS...]. Особенностью работы этой приемной станции является также высокая частота дискретизации входного сигнала – одно измерение в секунду.

Методика

Алгоритм определения абсолютного вертикального ПЭС

В работе используется уже опубликованная и широко известная методика определения ПЭС [Афраймович, 2006; Cherniak, Zakharenkova, 2017; Мыльникова и др., 2013] по данным GPS-измерений.

Стандартной формой передачи и хранения данных GPS-измерений являются файлы в формате RINEX (стандарт UNAVCO СОМРАСТ 3) [Lou, Wier, 2014]. Файлы RINEX с расширениями *.m12 и *.m21 содержат фазовые измерения псевдодальности L1 и L2 для наблюдений для основной и дополнительной частот GPS - 1575.42 и 1227.60 МГц. Файлы RINEX с расширениями *.pl1 и *.pl2 содержат кодовые измерения псевдодальности Р1 и Р2 для приведенных выше частот. При прохождении радиосигнала через ионосферу проявляется ионосферная задержка. Время задержки прямо пропорционально ПЭС вдоль всей траектории распространения радиоволны.

Для вычисления ПЭС используются следующие выражения [Афраймович, 2006]: по фазовым измерениям по двум частотам вдоль луча «приемник – спутник» –

$$J_{\varphi} = \frac{1}{40.308} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 + f_2^2} \cdot \left[(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \delta L \right];$$
(1)

по кодовым задержкам для тех же двух частот -

$$J_P = \frac{1}{40.308} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 + f_2^2} \cdot \left[(P_1 - P_2) + \delta P \right].$$
(2)

Здесь $J\phi$ и Jp – рассчитанные значения ПЭС; $L_1\lambda_1$ и $L_2\lambda_2$ – приращения фазового пути сигнала, вызванные задержкой фазы в ионосфере, $L_1 = \Delta \phi/2\pi$ и $L_2 = \Delta \phi/2\pi$ – фазовые измерения GPS-приемника, выполненные на частоте f_1 и f_2 соответственно; δL – ошибка измерения фазы; P_1 и P_2 – групповой путь для частот f_1 и f_2 ; δP – ошибка измерения дальности по P-коду. В работе используется разность $J\phi - Jp$, взятая по абсолютной величине, так как она несет наиболее исчерпывающую информацию об изменении амплитуды ПЭС.

Общепринятой единицей измерения ПЭС является TECU (total electron content unit), она равна величине 10¹⁶ м⁻² [Афраймович, 2006; Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

Преобразование наклонного ПЭС в вертикальное ПЭС

ПЭС, полученное из выражений (1) и (2), пропорциональное расстоянию между приемником и передатчиком и измеренное при различных углах расположения навигационного спутника относительно линии горизонта θ_s , является «наклонным». При исследовании ионосферных возмущений требуется некоторая нормировка амплитуды вариаций ПЭС. Для этого рассчитанную величину ПЭС необходимо преобразовать в значения вертикального ПЭС относительно подионосферной точки (точки пересечения луча зрения на навигационный ИСЗ с высотой главного максимума концентрации электронов ионосферы, соответствующее $\theta_s = 90^\circ$). Для преобразования ПЭС из наклонного в вертикальное применяют следующий критерий [Иванов и др., 2011]:

$$J_{\text{верт}} = J_{\text{гор}} \cdot \left[\arcsin\left(\frac{R_e}{R_e + h_{max}} \cdot \cos(\theta_s)\right) \right], \tag{3}$$

где $J_{\text{верт}}$ и $J_{\text{гор}}$ – значения вертикального и наклонного ПЭС, ТЕСU; R_{e} – радиус Земли, h_{max} – высота максимума электронной концентрации в ионосфере, θ_{s} – угол расположения навигационного спутника относительно линии местного горизонта.

Поскольку амплитуда колебаний ПЭС с периодами 2–120 мин варьирует в большом диапазоне значений, анализ спектров производится в логарифмическом масштабе [Афраймович, 2006]. С целью получения количественных оценок изменения ПЭС во время дополнительных возмущений (умеренной магнитной бури) вычисляется тангенс угла наклона спектра мощности $S^2(F)$ в логарифмическом масштабе определяется наклоном аппроксимирующей прямой, которая может быть описана выражением:

$$lg(S^{2}(F)) = k \cdot lg(F) + b, \qquad (4)$$

где коэффициент $k = tg(\alpha)$ – это тангенс угла наклона α аппроксимирующей прямой; b – масштабный коэффициент, характеризующий подъем прямой относительно оси абсцисс. Эти величины рассчитываются методом наименьших квадратов.

Результаты

Для наблюдения изменения ПЭС во время прохождения умеренной магнитной бури с 31.08.2019 по 3.09.2019 были обработаны результаты измерений GPS-станции POL2 в интервале 243–247-й день 2019 г. Чтобы ограничить область ионосферы, для которой будут найдены значения вертикального ПЭС, выбираются данные только от тех спутников, которые имеют наиболее полное покрытие зоны наблюдения. Исходя из этого критерия и для получения наиболее достоверной и полной информации было выбрано 4 спутника с непрерывным сигналом (спутники GPS G7, G10, G14, G20). На рис. 1 показаны траектории движения этих спутников в полярной системе координат.

Для получения информации об изменении ПЭС в рассматриваемом интервале выделяли скользящее окно размером 1024 точки и с шагом 16 точек. Скользящее окно выбирается кратным 2ⁿ, так как этого требует алгоритм быстрого преобразования Фурье. В каждом окне производили быстрое преобразование Фурье для разности $J\varphi - Jp$, вычисляли спектр мощности сигнала и находили угол наклона графика – коэффициент *k* (выражение (4)). Спектр мощности сигнала сохраняет информацию только об амплитудах спектральных составляющих [Рязанцева и др., 2017], поэтому он будет наиболее информативен при наличии значительных изменений в измеренном ПЭС. На рис. 2 показан спектр мощности флуктуаций ПЭС для спутника G7 в течение всего времени его прохождения, а также пример определения угла наклона спектра мощности ПЭС.

В таблице представлены характеристики магнитной бури в дни, когда она происходила, максимальные значения уровня K_p в течение суток и ПЭС. По данным таблицы видно, что значения ПЭС возрастают в соответствии с показателями интенсивности магнитного поля Земли.



Рис. 1. Траектории для спутников G7, G10, G14, G20, полученные в полярных координатах, в 243-й день измерений 2019 г.

Figure 1. Trajectories for the G7, G10, G14, G20 satellites obtained in Cartesian coordinates on the 243rd day of measurements in 2019.

Table. Characteristics of the magnetic storm August 31 – September 3, 2019								
День года	Усредненный планетарный	ПЭС, (макси	Индекс магнитной					
	индекс, <i>К</i> _р	<i>G</i> 7	G10	<i>G</i> 14	G20	бури, G		
243	6	13	11.9	17	9.9	2		
244	6	29	17	13	9	2		
245	5	5.9	13.1	9	9	1		
246	4	7.9	9.9	2.6	7.3	0		

Таблица. Характеристики магнитной бури 31.08. – 3.09.2019	
Table Characteristics of the magnetic storm August 31 – Sentember 3, 20	01

Анализ динамики изменения угла спектра мощности ПЭС продемонстрировал, что ПЭС наиболее активно изменяется во время прохождения магнитных бурь. На рис. 3 показаны графики изменения угла наклона спектра мощности ПЭС и усредненного планетарного индекса K_p в течение суточного периода в первый и третий дни наблюдения (243-й и 245-й дни года). При $K_p > 4$ прослеживается рост амплитуды изменения угла наклона спектра мощности ПЭС, а при $K_p < 4$ – спад угла наклона спектра. При $K_p = 4$ существенных изменений ПЭС не наблюдалось. Как видно из рис. 2 и 3, угол наклона спектра мощности воз-

растает с ростом K_p . Отмечается взаимосвязь между повышением и понижением K_p и амплитудой изменяющегося угла наклона спектра мощности ПЭС.

На рис. 4 показано изменение наклона спектра мощности ПЭС tg (α) с 243-го по 246-й день года для спутника G10. На графиках в местах возрастания индекса K_p наблюдаются экстремумы угла наклона спектра мощности ПЭС.

На представленных графиках отчетливо видна взаимосвязь ПЭС с длительностью магнитной бури. Таким образом, можно получить количественные изменения ПЭС при различных магнитных бурях.



Рис. 2. Спектр мощности флуктуаций ПЭС. Нижний график показывает аппроксимируемый участок спектра мощности в логарифмическом масштабе. Аппроксимирующая прямая с рассчитанными точками выделена красным цветом.

Figure 2. Power spectrum of the TEC fluctuations. The bottom graph shows an approximated portion of the power spectrum on a logarithmic scale. The approximating straight line with calculated points is highlighted in red.


Рис. 3. Взаимосвязь изменений индекса K_p и угла наклона спектра мощности ПЭС tg (α) в течение суточного прохождения в первый (243-й день года, левая колонка) и третий (245-й день года, правая колонка) дни наблюдения магнитной бури для спутников G7 (а и е), G10 (b и f), G14 (с и g), G20 (d и h). **Figure 3.** The relationship of changes in the K_p index and the slope of the TEC power spectrum tg (α) during the daily passage on the first (243rd day of year, left column) and third (245th day of year, right column) days of observation of the magnetic storm for the G7 (a, e), G10 (b, f), G14 (с, g), G20 (d, h) satellites.

Геофизика, сейсмология / Geophysics, Seismology



Рис. 4. Изменение индекса $K_{_p}$ и угла наклона спектра мощности ПЭС tg (α) в течение 4 дней наблюдения магнитной бури для спутника G10.

Figure 4. Change in the K_p index and the slope of the TEC power spectrum tg (α) during 4 days of observation of the magnetic storm for the G10 satellite.

Выводы

Данные по изменению угла наклона спектра мощности вариаций ПЭС позволяют оценить изменение ионосферы во время прохождения бури. Для определения параметров ПЭС использовались высокоточные данные перманентной GPS-станции. В обработке участвовали измерения по тем спутникам, для которых получен наиболее длительный непрерывный сигнал. Анализ GPS-измерений проводился для интервала времени, в котором была зарегистрирована геомагнитная буря 31 августа – 3 сентября 2019 г. Из 14 магнитных бурь, зафиксированных в 2019 г., для исследований была выбрана буря самой большой продолжительности. Показаны существенные изменения угла наклона спектра мощности вариаций ПЭС во время прохождения этой умеренной геомагнитной бури.

Список литературы

1. Афраймович Э.Л. **2006**. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли*. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 480 с.

2. Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. **2011.** Ионосферный отклик на подводные курильские землетрясения по наблюдениям со спутников GPS. *Исследование Земли из космоса*, 1: 30–38.

3. Иванов В.А., Желонкин А.Ю., Рябова Н.В., Зуев А.В. **2011.** Влияние геомагнитных возмущений на полное электронное содержание ионосферы. Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы, 11(1): 24–30.

4. Мыльникова А.А., Ясюкевич Ю.В., Демьянов В.В. **2013.** Определение абсолютного вертикального полного электронного содержания в ионосфере по данным ГЛОНАСС/GPS. *Солнечно-земная физика*, 24: 70–77.

5. Рязанцева М.О., Будаев В.П., Рахманова Л.С., Бородкова Н.Л., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И., Шафранкова Я., Немечек З., Прех Л., Питна А. **2017.** Перемежаемость плотности солнечного ветра вблизи межпланетной ударной волны. *Геомагнетизм и аэрономия*, 57(6): 696–705. https://doi.org/10.7868/S0016794017060104

6. Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Sakharov Y.A. **2017.** Geomagnetic and ionospheric response to the interplanetary shock on January 24, 2012. *Earth Planets Space*, 69(105). https://doi.org/10.1186/s40623-017-0696-1

7. Candido C.M.N., Batista I.S., Klausner V. 2018. Response of the total electron content at Brazilian low latitudes to corotating interaction region and high-speed streams during solar minimum 2008. *Earth Planets Space*, 70(104). https://doi.org/10.1186/s40623-018-0875-8

8. Cherniak I., Zakharenkova I. **2017**. New advantages of the combined GPS and GLONASS observations for high-latitude ionospheric irregularities monitoring: case study of June 2015 geomagnetic storm. *Earth Planets Space*, 69(66). https://doi.org/10.1186/s40623-017-0652-0

9. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. **2001.** *Global positioning system: Theory and practice.* New York: Springer-Verlag, 5, 382 p. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6199-9 10. *IGS: The International GNSS Service.*

URL: http://www.igs.org/igsnetwork/network by site.php?site=pol2 (accessed 15.01.2020).

11. Lanyi G.E., Roth T. A **1988.** Comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and Beacon satellite observations. *Radio Science*, 4(23): 483–492. https://doi.org/ 10.1029/rs023i004p00483

12. Lou E., Wier S. **2014**. Teqc Tutorial: Basics of Teqc Use and Teqc Products. *UNAVCO Inc*: 42. URL: https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/doc/UNAVCO_Teqc_Tutorial.pdf

13. Pezzopane M., Del Corpo A., Piersanti M. **2019.** On some features characterizing the plasmasphere-magnetosphere-ionosphere system during the geomagnetic storm of 27 May 2017. *Earth Planets Space*, 71(77). https://doi.org/10.1186/s40623-019-1056-0

References

1. Afraimovich E.L. **2006**. *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli* [*GPS-monitoring of the Earth's upper atmosphere*]. Irkutsk: GU NTs RVKh VSNTs SO RAMN [SC of Reconstructive and Restorative Surgery of the ESSC of the SB RAMS], 480 p. (In Russ.).

2. Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Steblov G.M., Shalimov S.L. **2011**. Ionospheric response to Kuril undersea earthquakes from GPS satellite data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Earth Observation and Remote Sensing*, 1: 30–38. (In Russ.).

3. Ivanov V.A., Zhelonkin A.Yu., Ryabova N.V., Zuev A.V. **2011**. Influence of geomagnetic disturbances on the ionospheric total electron content. *Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy = Vestnik of Mari State Technical University. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems, 11(1): 24–30. (In Russ.).

4. Mylnikova A.A., Yasyukevich Yu.V., Demyanov V.V. **2013**. Estimation of absolute vertical total electron content in the ionosphere from GLONASS/GPS data. *Solnechno-Zemnaya Fizika = Solar-Terrestrial Physics*, 24: 70–77. (In Russ.).

5. Ryazantseva M.O., Budaev V.P., Rakhmanova L.S., Borodkova N.L., Zastenker G.N., Yermolaev Y.I., Safrankova J., Nemecek Z., Prech L., Pitna A. **2017**. Intermittency of the solar wind density near the interplanetary shock. *Geomagnetism and Aeronomy*, 57(6): 645–654. https://doi.org/10.1134/s001679321706010x

6. Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Sakharov Y.A. **2017.** Geomagnetic and ionospheric response to the interplanetary shock on January 24, 2012. *Earth Planets Space*, 69(105). https://doi.org/10.1186/s40623-017-0696-1

⁷. Candido C.M.N., Batista I.S., Klausner V. **2018.** Response of the total electron content at Brazilian low latitudes to corotating interaction region and high-speed streams during solar minimum 2008. *Earth Planets Space*, 70(104). https://doi.org/10.1186/s40623-018-0875-8

8. Cherniak I., Zakharenkova I. **2017**. New advantages of the combined GPS and GLONASS observations for high-latitude ionospheric irregularities monitoring: case study of June 2015 geomagnetic storm. *Earth Planets Space*, 69(66). https://doi.org/10.1186/s40623-017-0652-0

9. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. **2001.** *Global positioning system: Theory and practice.* Vienna, Springer-Verlag, 382 p. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6199-9

10. IGS: The International GNSS Service. URL: http://www.igs.org/igsnetwork/network_by_site. php?site=pol2 (accessed: 15.01.2020)

11. Lanyi G.E., Roth T.A. **1988.** Comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and Beacon satellite observations. *Radio Science*, 23(4): 483–492. https://doi.org/10.1029/rs023i004p00483

12. Lou E., Wier S. 2014. Teqc Tutorial: Basics of Teqc Use and Teqc Products. UNAVCO Inc: 42.

URL: https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/doc/UNAVCO_Teqc_Tutorial.pdf

13. Pezzopane M., Del Corpo A., Piersanti M. **2019.** On some features characterizing the plasmaspheremagnetosphere-ionosphere system during the geomagnetic storm of 27 May 2017. *Earth Planets Space*, 71(77). https://doi.org/10.1186/s40623-019-1056-0

Сведения об авторах

КИРИЛОВ Артем Александрович, инженер, лаборатория моделирования энергонасыщенных сред, Научная станция РАН в г. Бишкеке, artemmiroy117@gmail.com

СЫЧЕВ Владимир Николаевич (ORCID 0000-0001-7508-9087), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория моделирования энергонасыщенных сред, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Киргизия, sychev@gdirc.ru

УДК 551.248.2,551.89

Эффект гидроизостатической компенсации в зависимости от ширины шельфа на примере моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря

© 2020 Р. Ф. Булгаков*, В. В. Афанасьев

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

Резюме. С помощью численного моделирования обнаружено, что на характер послеледниковой трансгрессии на побережьях моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря влияют ширина шельфа и континентального склона в зависимости от вязкостных свойств слоев мантии. В частности, отметки превышения современного уровня моря, характерные для климатического оптимума голоцена 4–6 тыс. л.н., могут располагаться на разных высотах. В зависимости от площади, оказавшейся под увеличивающейся нагрузкой прибывающей воды при подъеме уровне моря в период послеледниковья, и величины значения вязкости мантийных слоев земная поверхность по-разному реагирует на изменение нагрузки на нее и с разной скоростью восстанавливает изостатический баланс.

Ключевые слова: послеледниковая трансгрессия, вязкость мантии, гидроизостазия, вертикальные движения, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море

Для цитирования: Булгаков Р.Ф., Афанасьев В.В. Эффект гидроизостатической компенсации в зависимости от ширины шельфа на примере моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 3, с. 305–320. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.305-312.313-320

For citation: Bulgakov R.F., Afanas'ev V.V. Effect of hydroisostatic compensation depending on the shelf width on the example of the Laptev and the East Siberian seas. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 305–320. (Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.305-312.313-320

Effect of hydroisostatic compensation depending on the shelf width on the example of the Laptev and the East Siberian seas

Rustam F. Bulgakov*, Victor V. Afanas'ev

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

Abstract. Using the method of numerical simulation, we found the nature of the postglacial transgression along the coasts of the Laptev and the East Siberian seas to be affected by the shelf width and the continental slope depending on the viscosity properties of mantle layers. In particular, the marks exceeding the contemporary sea level, which are typical for the Holocene climatic optimum of 4–6 ka BP, may be located at different heights. Depending on the area, which fell under the increasing load of the incoming water due to the sea level rise during the postglacial period, and the viscosity of the mantle layers, the earth's surface responds differently to changes in the load and restores its isostatic balance with different rates.

Keywords: postglacial transgression, mantle viscosity, hydroisostasy, vertical movements, Laptev Sea, East Siberian Sea

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Введение

Во время климатического оптимума голоцена, 4–6 тыс. л.н., с общепланетарным температурным режимом, превышающим современную климатическую температуру, логично ожидать дополнительную деградацию объема покровных ледников с переходом талой воды в Мировой океан и, вследствие этого, превышением современного уровня моря. И действительно, следы поднятых береговых линий отмечаются на многих побережьях Мирового океана.

При выполнении численных решений так называемого уравнения уровня моря (sea level equation – SLE) в сценариях таяния покровного оледенения не учитываются возможные осцилляции эвстатического уровня моря в результате относительного уменьшения или увеличения объема покровных ледников вследствие климатических колебаний. Таяние ледников принимается как происходившее по асимптотическому закону с завершением деградации Антарктического ледника около 4 тыс. л.н.

Тем не менее для многих побережий моделирование показало превышение уровня моря в период времени 4–6 тыс. л.н. Такие зоны получили наименование – зоны VI Кларка.

В данной работе предпринимается попытка исследовать этот феномен на примере побережий морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, которые, как будет показано ниже, удачно расположены для решения подобных задач.

Зона VI Кларка

В середине XX в. было установлено, что послеледниковая трансгрессия, особенно на завершающем этапе, позднее 6 тыс. л.н., имела неодинаковый сценарий и неравномерную скорость наступления моря в различных районах Мирового океана.

Базовыми рассматривались сценарии Ф. Шепарда и Р. Фейрбриджа. Шепард [Шепард, 1969] предполагал плавное повышение уровня моря, которое, по асимптоте, достигло современного уровня, но никогда не превышало его. Его оппонент Фейрбридж [Fairbridge, 1961] предложил альтернативное представление о ходе трансгрессии – с осцилляциями. По Фейрбриджу, уровень Мирового океана 5.0 и 3.7 тыс. л.н. превысил современный на 3–4 м, а далее после ряда мелких осцилляций 2.3 и 1.2 тыс. л.н. амплитудой +1.5 м вернулся к уровню близкому современному.

Решение для обсуждаемого противоречия было предложено коллективом исследователей J. Clark et al. [1978]. Они при численном моделировании учли изменения гравитационного поля в результате перераспределения масс льда и воды на поверхности Земли и реологические свойства литосферы и мантийных слоев. Эти авторы также выделили на поверхности Земли зоны со схожими сценариями хода послеледниковой трансгрессии, т.е. зоны, в которых уровень моря превышал современный, зоны, в которых уровень моря понизился, и др. Всего было выделено 6 зон. В дальнейшем, на основе этой работы, моделирование совершенствовалось.

Своеобразной зоной среди выделяемых оказалась зона VI Кларка, в которую вошли материковые побережья. На протяженных материковых побережьях по всему миру были зафиксированы превышения современного уровня моря, в основном совпадавшие по времени с климатическим оптимумом голоцена около 6 тыс. л.н.

В других зонах, особенно в зоне IV Кларка, расчеты, наоборот, показали океаническое понижение уровня (zone-IV oceanic submergence) и отсутствие превышений современного уровня моря в голоценовый климатический оптимум [Clark et al., 1978].

Другой особенностью, влияющей на изменение относительного уровня моря на конкретных побережьях и маскирующей эффект зоны VI Кларка, оказалось появление своеобразных вздутий – форбалдж (forebuldge) (зона II Кларка [Clark et al., 1978]), образовавшихся на земной поверхности по периметру областей покровных ледников в период максимума покровного оледенения (last glacial maximum – LGM). Появление вздутий объяснялось растеканием вещества вязких мантийных слоев из-под области оледенения под тяжестью ледника [Glacial..., 2009]. Такие вздутия по мере таяния ледников компенсировались, поверхность понижалась в своих высотных отметках, и этот процесс на побережьях фиксируется в древних береговых линиях.

Для изучения эффекта зоны VI Кларка удобно побережье, достаточно удаленное как от областей непосредственного развития ледниковых покровов (чтобы уйти из зоны форбалдж), так и от современных активных регионов вроде Курило-Камчатской зоны субдукции.

В этом отношении подходящим районом является побережье морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. Моря находятся не только за пределами областей последнего покровного оледенения, как Фенноскандии, так и Северо-Американского, но и за пределами распространения связанных с ними зон форбалдж. Современные активные зоны субдукции также не доминируют в этом регионе.

Особенностью моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, удобной для изуче-

ния эффекта леверинга (continental levering) [Stocchi, Spada, 2007] в голоценовый оптимум, является различная ширина шельфов этих морей. Шельф моря Лаптевых – около 500 км – в два раза уже шельфа Восточно-Сибирского моря. При этом шельф Восточно-Сибирского моря до половины своей ширины имеет глубины от 100 м и свал глубин континентального склона примерно на 500 метрах, а у моря Лаптевых эта зона гораздо уже.

Послеледниковые изменения уровня моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря по палеогеографическим данным

Побережья морей Лаптевых и Восточно-Сибирского изучены палеогеографическими методами в отношении послеледниковой трансгрессии слабо. Это связано прежде всего с труднодоступностью региона. Более детально изучено побережье моря Лаптевых.

Послеледниковая трансгрессия на побережье моря Лаптевых характеризуется повышением уровня моря в период с 9 до 6 тыс. л.н.,



Рис. 1. Батиметрическая карта-схема до изобаты 2000 м шельфа и континентального склона моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря (https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi). Залитые квадраты – участки, по которым смоделированные кривые хода послеледниковой трансгрессии (рис. 2) обсуждаются в статье.

после чего уровень стабилизировался. Имеются разрозненные сведения о превышении современного уровня моря в голоцене. Среди них интересные свидетельства проникновения морской воды в прибрежные озера, расположенные выше современного уровня в последние 2000 лет. В качестве примера подобного превышения современного уровня моря приводятся оз. Изменчивое на архипелаге Северная Земля у п-ова Таймыр и оз. Севастьян в районе дельты р. Лена. Озера располагаются на 6 и 5 м соответственно выше современного уровня моря, и, как оценивают исследователи, уровень моря около 2000 л.н. должен был превышать современный не менее чем на 10 м, о чем «...свидетельствует возраст погребенной озерными отложениями древесины – 2100 радиоуглеродных лет [Большиянов и др., 1995]» (цит. по: [Макаров, 2017, с. 87]).

Анализ топографических карт XIX в. [Большиянов и др., 2013] показал, что уровень моря мог располагаться выше современного, возможно, всего 150–200 л.н.

работе, посвященной изменениям B уровня моря Лаптевых в послеледниковье, А.В. Гаврилов и др. [2006] по данным бурения скважин на шельфе и датировок древних береговых следов деятельности моря на побережьях реконструировали схемы расположения береговой линии в зависимости от возраста и кривую хода морской трансгрессии. Особенную роль при наступлении моря авторы отвели термоабразии и термокарстовым явлениям. Для периода голоценовой трансгрессии они пришли к выводу, что в период 5–3.5 тыс. л.н. уровень достигал абсолютных отметок 0..., +2, +3 м, а около тысячелетия назад — отметок +1, +2 м.

А.В. Баранская [2015], по результатам анализа датировок позднеплейстоценовых и голоценовых поднятых или затопленных береговых линий, предложила для шельфовой области моря Лаптевых, выделенной по критериям неотектонической активности, осредненную для крупных неотектонических областей скорость относительного изменения уровня моря за голоцен в 5.5 мм/год. Любопытно, что в смежной тектонической области, Верхоянской, расположенной частично на современной сухопутной части побережья моря Лаптевых, относительное изменение уровня моря за голоцен имеет противоположное направление, и оценено оно в -1.41 мм/год [Баранская, 2015].

Послеледниковые изменения уровня моря на побережье Восточно-Сибирского моря изучены еще меньше, чем на побережье моря Лаптевых. Для Восточно-Сибирского моря практически отсутствуют прямые оценки изменений уровня моря в послеледниковое время [Макаров, 2017]. Имеются данные по Новосибирским островам. По результатам документирования серии морских террас, датированных радиоуглеродным методом, и находки плавника из верхней части разреза отложений лайды на высоте 8 м предложена кривая изменений уровня моря в районе о. Жохова в голоцене [Анисимов и др., 2009]. Согласно этой кривой, уровень моря превышал современный около 4-4.9 тыс. л.н. на 6-8 м, около 1.2 тыс. л.н.- на 4-6 м. Авторы цитируемой работы предполагают значительный темп трансгрессии на начальном этапе на основании находок бивней мамонтов возрастом 12.5 тыс. лет в 130 км к северо-западу от о. Жохова, где преобладают глубины более 20 м. Датировка плечевой кости лошади с о. Вилькицкого, расположенного в 45 км к юго-западу от о. Жохова, позволила предположить, что о. Жохова сохранял связь с материком еще 7–9 тыс. л.н. [Анисимов и др., 2009]. Замедление трансгрессии связывают с тем, что происходило не трансгрессивное затопление, а постепенный захват суши морем в результате термической переработки многолетнемерзлых пород.

В фундаментальном труде П.А. Каплин и А.О. Селиванов [1999] на основе анализа выполненных к тому времени палеогеографических исследований склоняются к выводу, что на побережьях морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в оптимум голоцена уровень моря был близок к современному или превышал его не более чем на 1.5–3.0 м. А отмеченные превышения современного уровня моря на более высокие, до 10 м, значения обусловлены высокими штормовыми нагонами [Каплин, Селиванов, 1999].

Таким образом, в настоящее время пока недостаточно палеогеографических наблюдений о ходе послеледниковой трансгрессии, на которые можно опираться. Но предварительные результаты позволяют допустить, что ход трансгрессии на море Лаптевых и Восточно-Сибирском море был различен.

А.С. Макаров и Д.Ю. Большиянов [2011] отмечают, что ход уровня океана в течение голоцена в восточном и западном секторе российской Арктики различен и часто разнонаправлен. Для морей восточного сектора характерен трансгрессивный характер, а для морей западного сектора – регрессивный.

На различие в ширине шельфа и влиянии этой особенности на ход послеледниковой трансгрессии обратили внимание V. Klemann et al. [2015]. По результатам моделирования авторы оценили ход трансгрессии для рассматриваемых регионов в широком диапазоне реологических параметров мантийных слоев и мощности литосферы. По их данным, на шельфе Восточно-Сибирского моря благодаря эффекту гидроизостазии прогнозный ход уровня моря систематически опережал на 10–15 м ход трансгрессии при учете только эвстатической ее доли. Сравнение лаптевоморского шельфа с более крутым склоном шельфа Восточно-Сибирского моря показало, что вертикальные движения земной поверхности различались в ходе послеледниковой трансгрессии. Изгиб литосферы под Восточно-Сибирским морем начался мористее, чем под морем Лаптевых.

Результаты численного моделирования и обсуждение

Расчеты хода послеледниковой трансгрессии, выполненные в программном пакете SELEN 2.9 [Spada, Stocchi, 2006, 2007; Spada et al., 2012] (рис. 2) при различных реологических параметрах мантийных слоев, показали в общем случае для побережья Восточно-Сибирского моря превышение современного уровня моря, а для побережья моря Лаптевых отставание хода трансгрессии и практическое отсутствие превышения над современным уровнем моря.

Объяснение данного факта кроется в различии влияния эффекта гидроизостазии на более широком шельфе Восточно-Сибирского моря в сравнении с относительно узким шельфом моря Лаптевых.



Рис. 2. Кривые хода трансгрессии для морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в зависимости от выбранной вязкостной модели Земли согласно таблице. Пункты, для которых приводятся кривые хода трансгрессии, показаны залитыми квадратиками на рис. 1. Для обоих морей пункты выбраны в заливах, чтобы избежать различия хода трансгрессии на мысу и в заливе.

Слой Земли	Мощность литосферы и значения вязкости слоев мантии			
	VM2a	VM2c	VM2e	VM2f
Литосфера, км	50	50	50	50
Верхняя мантия, 10 ²¹ Па·с	0.5	1.0	0.75	0.35
Транзитный слой, 10 ²¹ Па∙с	0.5	1.0	0.75	0.35
Нижняя мантия, 10 ²¹ Па·с	2.7	10	3.5	2.0

Таблица. Модели Земли, использованные в расчетах

Примечание. За основу взяты параметры модели VM2a, предложенные [Peltier, 1998] для моделирования восстановления изостатического равновесия в результате изменения объема покровных оледенений (glacial isostatic adjustment – GIA).

Согласно представлениям J. Clark и C. Lingle [1979], при регрессии моря во время максимума последней ледниковой эпохи снятие нагрузки воды вызывает перетекание мантийного вещества из-под континента в район шельфа и океанического дна. Это вызывает нисходящие движения прибрежной зоны континента. Затем, с наступлением межледникового времени, по мере наполнения чаши морского бассейна талой водой ледников, водная нагрузка на морское дно и шельф увеличивается, что ведет к возврату мантийного вещества в область под континентом, и береговая зона начинает подъем. Процесс этот зависит от вязкости мантийного вещества: чем выше вязкость, тем больше времени требуется для перетекания (рис. 3).

На рис. 3 представлены кривые релаксации, рассчитанные в программном пакете SELEN 2.9 [Spada, Stocchi, 2006, 2007; Spada et al., 2012] по методике, предложенной [Peltier, 1976]. Кривые отображают зависимость времени возврата к равновесному состоянию после воздействия и снятия нагрузки на планетарные слои Земли.

По кривым релаксации видно, что при наибольшей вязкости мантийного вещества (модель VM2c, рис. 3а) время релаксации



Рис. 3. Спектры изостатической релаксации в земных слоях по результатам моделирования в программном пакете SELEN 2.9, полученные для моделей VM2c (а) и VM2e (b). Кривая M0 соответствует мантии, C0 – границе ядра и мантии, L0 – литосфере, M1 и M2 соответственно мантийным границам 670 и 470 км, T1–T4 – слоям с упруго-вязким поведением.

слоев увеличивается практически на половину порядка в сравнении с моделью с наименьшей вязкостью (модель VM2e, рис. 3b), т.е. требуется в несколько раз более продолжительное время, чтобы земная поверхность вернулась к изостатически сбалансированному равновесию.

В случае рассматриваемых морей нагружение морского дна в районе континентального склона и шельфа в Восточно-Сибирском море будет происходить с меньшей нагрузкой благодаря очевидной большей ширине и, соответственно, большей площади шельфа в сравнении с шельфом моря Лаптевых, что замедлит возврат мантийного вещества под область континента на побережье Восточно-Сибирского моря. Запаздывание возврата мантийного вещества под континентальную область вызовет запаздывание подъема побережья, и море оставит следы береговой деятельности на отметках, которые позже будут подняты при достижении изостатического равновесия. В результате следы уровня моря в период достижения максимума эвстатической трансгрессии (в нашем случае 4 тыс. л.н.) окажутся выше современного уровня моря.

Данный механизм подтверждается результатами моделирования (рис. 2).

Превышения современного уровня моря на Восточно-Сибирском побережье показывают кривые с низкими значениями вязкости мантийного вещества. Низкие значения вязкости обусловливают гидроизостатическую компенсацию, вследствие чего древние следы уровня моря отмечаются выше современного уровня. При высоких же значениях мантийной вязкости, как показывают расчеты, превышения современного уровня моря отсутствуют и на побережье Восточно-Сибирского моря (рис. 2b, VM2c).

Отсутствие достаточных данных о ходе послеледниковой трансгрессии на побережье Восточно-Сибирского моря по палеогеографическим наблюдениям с абсолютными датировками не дает возможности отдать предпочтение какой-то из использованных вязкостных моделей, но если для побережья Восточно-Сибирского моря процесс гидроизостатической компенсации еще не закончился (при низкой вязкости в сегменте мантии), то можно ожидать, что осушение побережья и отступление моря может оказаться ведущим процессом в ближайшем будущем.

Заключение

Уникальное расположение по отношению к областям развития покровных оледенений и большая разница в ширине шельфа и континентального склона моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря позволяют по результатам численного моделирования подтвердить наличие эффекта continental levering для континентальных побережий и его зависимость от ширины шельфа и континентального склона.

Очевидно, что необходимо продолжение сбора палеогеографических данных о ходе послеледниковой трансгрессии на побережьях и шельфе этих морей. При наличии достаточных данных, особенно с побережья Восточно-Сибирского моря, сравнительное моделирование позволило бы более точно определить реологические свойства земных слоев, а также точнее прогнозировать и реконструировать сценарий послеледниковой трансгрессии и его зависимость от изменения объема покровных ледников.

Список литературы

1. Анисимов М.А., Иванова В.В., Пушина З.В., Питулько В.В. **2009.** Лагунные отложения острова Жохова: возраст, условия формирования и значение для палеогеографических реконструкций региона Новосибирских островов. *Известия РАН, Серия географическая*, 5: 107–119.

2. Баранская А.В. **2015.** *Роль новейших вертикальных тектонических движений в формировании рельефа побережий российской Арктики*: дис. ... канд. геогр. наук. СПб.

3. Большиянов Д.Ю., Макеев В.М. **1995.** Архипелаг Северная Земля. Оледенение, история развития природной среды. СПб.: Гидрометеоиздат, 217 с.

4. Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. **2013.** *Происхождение и развитие дельты р. Лены.* СПб.: ААНИИ, 268 с.

5. Гаврилов А.В., Романовский Н.Н., Хуббертен Х.-В. **2006.** Палеогеографический сценарий послеледниковой трансгрессии на шельфе моря Лаптевых. *Криосфера Земли*, 10(1): 39–50. 6. Каплин П.А., Селиванов А.О. **1999.** Изменение уровня морей России и развитие берегов: проилое, настоящее, будущее. М.: ГЕОС, 299 с.

7. Макаров А.С. **2017.** *Колебания уровня арктических морей в голоцене*: дис. ... д-ра геогр. наук. СПб.

8. Макаров А.С., Большиянов Д.Ю. **2011.** Колебания уровня арктических морей России в голоцене. В кн.: *Проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена*, 3. М.: Географический факультет МГУ, с. 315–320. http://www.aari.ru/misc/publicat/paa/PAA-109/101-110.pdf

9. Шепард Ф.П. **1969.** *Морская геология*. Л.: Недра, 462 с.

10. Clark J., Lingle C. **1979.** Predicted relative sea-level changes (18000 Years B.P. to present) caused by Late-Glacial retreat of Antarctic Ice Sheet. *Quaternary Research*, 11: 279–298. https://doi.org/10.1016/0033-5894(79)90076-0

11. Clark J., Farrell W., Peltier W. **1978.** Global changes in postglacial sea level: Numerical calculations. *Quaternary Research*, 9(3): 265–287. https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90033-9

12. Fairbridge R. **1961.** Eustatic changes in sea level. *Physics and Chemistry of the Earth*, 4: 99–185. https://doi.org/10.1016/0079-1946(61)90004-0

13. Klemann V., Heim B., Bauch H.A., Wetterich S., Opel T. **2015.** Sea-level evolution of Laptev Sea and East Siberian Sea since the last glacial maximum. *Arktos*, 1: 1(2015).

https://doi.org/10.1007/s41063-015-0004-x

14. Peltier W.R. **1976.** Glacial-Isostatic adjustment – II. The inverse problem. *Geophysical J. of the Royal Astronomical Society*, 46: 669–705.

15. Peltier W.R. **1998.** Postglacial variations in the level of the sea: Implications for climate dynamics and solid-Earth geophysics. *Reviews of Geophysics*, 36(4): 603–689. https://doi.org/10.1029/98rg02638

 Spada G., Stocchi P. 2006. The sea level equation: Theory and numerical examples. Roma: Aracne, 96 p.
Spada G., Stocchi P. 2007. SELEN: A Fortran 90 program for solving the "sea-level equation". Computers and Geosciences, 33(4): 538–562. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.08.006

18. Spada G., Sabadini R., Yuen D.A, Ricard Y. **1992.** Effects on postglacial rebound from the hard rheology in the transition zone. *Geophysical J. International*, 109(2): 683–700. doi:10,1111/j.1365-246X.1992.tb00125.x.

19. Spada G., Melini D., Galassi G., Colleoni F. **2012.** *Modeling sea level changes and geodetic variations by glacial isostasy: the improved SELEN code*. http://arxiv.org/abs/1212.5061

20. Stocchi P., Spada G. **2007.** Glacio and hydro-isostasy in the Mediterraneon Sea: Clark's zones and role of remote ice sheets. *Annals of Geophysics*, 50(6). https://doi.org/10.4401/ag-3054

21. Whitehouse P. **2009.** Glacial isostatic adjustment and sea-level change: State of the art report. *Technical Report*, TR-09-11.

Сведения об авторах

БУЛГАКОВ Рустям Фаридович (ORCID 0000-0001-9095-3785), кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, r.bulgakov@imgg.ru

АФАНАСЬЕВ Виктор Викторович (ORCID 0000-0002-2344-1269), кандидат географических наук, заведующий лабораторией береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, vvasand@mail.ru

УДК 551.248.2,551.89

TRANSLATION https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.305-312.313-320

Effect of hydroisostatic compensation depending on the shelf width on the example of the Laptev and the East Siberian seas

Rustam F. Bulgakov*, Victor V. Afanas'ev

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

Abstract. Using the method of numerical simulation, we found the nature of the postglacial transgression along the coasts of the Laptev and East Siberian seas to be affected by the shelf width and the continental slope depending on the viscosity properties of mantle layers. In particular, the marks exceeding the contemporary sea level, which are typical for the Holocene climatic optimum of 4–6 ka BP, may be located at different heights. Depending on the area, which fell under the increasing load of the incoming water due to the sea level rise during the postglacial period, and the viscosity of the mantle layers, the earth's surface responds differently to changes in the load and restores its isostatic balance with different rates.

Keywords: postglacial transgression, mantle viscosity, hydroisostasy, vertical movements, Lapteva Sea, East Siberian Sea

For citation: Bulgakov R.F., Afanas'ev V.V. Effect of hydroisostatic compensation depending on the shelf width on the example of the Laptev and the East Siberian seas. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 305–320. (Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.305-312.313-320

Introduction

During the Holocene climatic optimum, 4–6 ka BP, by a global temperature regime exceeding the present-day climatic temperature, it is logical to expect additional degradation of the ice sheets volume with the transition of melt water to the World Ocean and, as a result, an excess of the contemporary sea level. Indeed, the traces of uplifted coastlines are found on many coasts of the World Ocean.

The probable oscillations of the eustatic sea level resulting from the relative decrease or increase of the ice sheets volume due to the climatic fluctuations are not taken into account when numerical solutions of the so-called sea level equation (SLE) are performed in the scenarios of the ice sheets melting. The glaciers melting is taken as occurring according to the asymptotic law with completion of degradation of the Antarctic ice sheet about 4 ka BP.

Nevertheless, the simulation showed an excess of the sea level within the period of 4–6 ka BP for many coasts. Such zones were named Clark's Zone VI.

In the present work, we make an attempt to study this phenomenon exemplified by the coasts of the Laptev and East Siberian seas, which are well located for such problems solving.

Clark's zone VI

In the middle of the XX century, it was founded, that the postglacial transgression, especially at the ending stage, later than 6 ka BP, had different scenarios and uneven rate of sea advance in various areas of the World Ocean.

F. Shepard and R. Fairbridge scenarios were considered as basic. Shepard [1969] assumed

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Булгаков Р.Ф., Афанасьев В.В. Эффект гидроизостатической компенсации в зависимости от ширины шельфа на примере моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. *Translation by G.S. Kachesova*.

a gradual rise of sea level reached the present meaning by the asymptote, but never exceeded it. His opponent, Fairbridge [1961] proposed an alternative conception of oscillations presence in the transgression course. According to Fairbridge, the World Ocean level has exceeded the present one by 3–4 m 5.0 and 3.7 ka BP, and then returned to the meaning close to the present after a series of small oscillations with an amplitude of 1.5 m 2.3 and 1.2 ka BP.

The solution for the discussed contradiction was offered by the J. Clark et al. [1978]. In numerical simulation, they took into account changes in the gravity field resulting from redistribution of ice and water masses on the Earth's surface and rheological properties of the lithosphere and mantle layers. These authors also identified six zones with similar scenarios of the postglacial transgression on the Earth's surface, i.e., the zones where the sea level had exceeded the present one, the zones, in which it had decreased, etc. Six zones

were identified in total. Further, the simulation was improved on the base of this work.

Clark's zone VI, which includes continent coasts, has turned out to be a peculiar zone among the identified ones. The excesses of the contemporary sea level, which were simultaneous with the Holocene climatic optimum of about 6 ka BP, were recorded all over the world on the extended continent coasts.

In other zones, especially in Clark's zone IV, on the contrary, estimations showed oceanic level decrease (zone IV oceanic submergence) and absence of an excess of the contemporary sea level during the Holocene climatic optimum [Clark et al., 1978].

Another feature, affecting the changes in the relative sea level on the certain coasts and masking the effect of Clark's zone VI, was the appearance of forebulges, or Clark's zone II [Clark et al., 1978], formed on the Earth's surface along the perimeter of ice sheets areas during the last glacial maximum (LGM). The forebulges appearance was explained with the spreading of viscous mantle layers from under the glaciated area under the weight of a glacier [Glacial..., 2009]. As the glaciers melted, such bulges were compensated, bench marks of the surface dropped, and this process at the coasts was recorded in the ancient coastlines.

The coast, which is remote enough both from the areas of direct formation of the ice sheets (to leave a forebulge zone) and from the modern active regions like Kuril-Kamchatka subduction zone, is convenient to study the effect of Clark's zone VI.

In this respect, a suitable area is the coast of the Laptev and the East Siberian seas. The seas are located not only outside the regions



Figure 1. Bathymetric schematic map up to 2000 m isobath of the shelf and continental slope of the Laptev and the East Siberian seas (https://topex.ucsd. edu/cgi-bin/get_data.cgi). The areas, on which the simulated curves of the post-glacial transgression course are discussed in the article (Fig. 2), are marked with black squares.

of the last glaciation, both of Fennoscandia and the North American, but also outside the distribution of the associated forebulge zones. The contemporary active subduction zones also do not dominate in this region.

The feature of the Laptev and the East Siberian seas, which is convenient to study the effect of continental levering [Stocchi, Spada, 2007] during the Holocene optimum, is a different width of the shelves of these seas. The Laptev Sea shelf, which is about 500 km, is half as wide the East Siberian Sea ones. At the same time, the shelf of the East Siberian Sea has depths from 100 m up to half of its width, and the shelf break of the continental slope occurs at about 500 m, this zone in the Laptev Sea is much narrower.

Postglacial changes in the level of the Laptev and the East Siberian seas according to the paleogeographic data

The coasts of the Laptev and the East Siberian seas have been poorly studied using paleogeographic methods in respect of postglacial transgression. This primarily conditioned by inaccessibility of the region. The Laptev Sea coast is studied in more details.

Postglacial transgression at the Laptev Sea coast is characterized with the sea level increase in the period from 9 to 6 ka BP followed by its stabilization. There is scattered information about an excess of the contemporary sea level during the Holocene. There are interesting evidences of sea water penetration into the coastal lakes located above the contemporary level during the last 2000 years among them. Such an excess of the contemporary sea level is exemplified with Izmenchivoye Lake in the Severnaya Zemlya archipelago near the Taymyr Peninsula, and Sevastian Lake in the area of the Lena River delta. The lakes are located on 6 and 5 m above the contemporary sea level, respectively, and, according to the researchers assessments, the sea level at about 2000 years ago should exceed the contemporary one not less than 10 m, as "...evidenced by the age of wood buried by lake sediments - 2100 radiocarbon years [Bol'shiyanov et al., 1995]" (quoted in: [Ma-karov, 2017, p. 87]).

The analysis of topographical maps of the XIX century [Bol'shiyanov et al., 2013] showed that the sea level could be located higher than the contemporary one, possibly just 150-200 years ago. In the work devoted to the changes in the Laptev Sea level during the postglacial period, A.V. Gavrilov et al. [2006] reconstructed the schemes of the coastline location depending on the age and the curve of the sea transgression course using the data of well drilling at the shelf and dating of ancient coastal traces of the sea activity on the coasts. The authors assigned a special part to thermal abrasion and thermokarst phenomena during the sea transgression. For the Holocene transgression period, they came to a conclusion that the level reached the absolute marks of 0..., +2, +3 m during the period of 5-3.5 ka BP, and the marks were +1, +2 m at about 1000 years ago.

Based on the results of analysis of the dating of the Late Pleistocene and Holocene raised or submerged coastlines, A.V. Baranskaya [2015] proposed an averaged for large neotectonic areas rate of the relative change of the sea level for the Holocene to be 5.5 mm/year for the shelf area of the Laptev Sea, identified according to the criteria of neotectonic activity. It is interesting that the relative change in the sea level during the Holocene has an opposite direction and is estimated at -1.41 mm/year in the Verhoyanskaya adjacent tectonic area partly located on the current onshore part of the Laptev Sea coast [Baranskaya, 2015].

Postglacial changes in the sea level at the coast of the East Siberian Sea are studied even less than at the Laptev Sea coast. There are practically no direct assessments of the sea level changes during the postglacial period [Makarov, 2017]. There are data on the New Siberian Islands. The curve of the sea level changes in the area of Zhokhov Island during the Holocene is proposed based on the results of documenting of the marine terraces series, dated by the radiocarbon method, and the driftwood finds from the upper part of the section of laida deposits at a height of 8 m

[Anisimov et al., 2009]. In accordance with this curve, the sea level exceeded the contemporary one about 4-4.9 ka BP by 6-8 m, and by 4-6 m - about 1.2 ka BP. The authors of the cited work assume a significant rate of transgression at the initial stage on the ground of the finds of mammoth tusks with an age of 12.5 ka BP 130 km northwest of Zhokhov Island, where depths of more than 20 m prevail. Dating of horse humeral from Vilkitsky Island, located 45 km southwest of Zhokhov Island, allowed to suppose that Zhokhov Island had kept a connection with the continent as far back as 7-9 ka BP [Anisimov et al., 2009]. The transgression deceleration is associated with the fact that not a transgressive submergence has been occurring, but a gradual sea encroachment of the land resulting from thermal changes of the permafrost rocks.

In their fundamental work, P.A. Kaplin and A.O. Selivanov [1999], based on the analysis of already fulfilled paleogeographic studies, lean towards a conclusion that during the Holocene optimum, the sea level at the coasts of the Laptev and the East Siberian seas has been close to the contemporary one or exceeded it by not more than 1.5–3.0 m. And recorded excesses of the contemporary sea level by higher values up to 10 m are conditioned by high storm surges [Kaplin, Selivanov, 1999].

Thus, there are not enough paleogeographic observations of the postglacial transgression course, on which one can rely. However, the preliminary results allow us to assume that the transgression course on the Laptev and the East Siberian seas was different.

A.S. Makarov and D.Yu. Bol'shiyanov [2011] note that the course of the ocean level during the Holocene in the eastern and western sectors of the Russian Arctic is different and often multidirectional. The seas of the eastern sector are characterized with a transgressive character, while the seas of the western sector are characterized with a regressive character.

V. Klemann et al. [2015] paid attention to the difference in shelf width and this feature influence on the postglacial transgression course. Based on the simulation results, the authors estimated the transgression course for the studied regions in a wide range of rheological parameters of the mantle layers and the thickness of the lithosphere. According to their data, on the shelf of the East Siberian Sea, due to the effect of hydroisostasy, the predicted course of the sea level systematically kept ahead of the course of transgression by 10–15 m, taking into account only its eustatic part. Comparison of the Laptev Sea shelf with the steeper slope of the East Siberian Sea shelf showed the vertical movements of the earth's surface to be different during the postglacial transgression. The lithosphere bend under the East Siberian Sea began more seaward than under the Laptev Sea.

Numerical simulation results and discussion

Computations of the postglacial transgression course, which were performed in the SELEN 2.9 software suite [Spada, Stocchi, 2006, 2007; Spada et al., 2012] (Fig. 2) at various rheological parameters of the mantle layers, generally showed an excess of the contemporary sea level for the coast of the East Siberian Sea, and the lagging of the transgression course and near absence of an excess above the contemporary sea level for the coast of the Laptev Sea.

This fact is explained by the difference in the influence of the hydroisostasy effect on the wider shelf of the East Siberian Sea in comparison with the relatively narrow shelf of the Laptev Sea.

According to J. Clark and C. Lingle [1979], the water load removal causes the overflow of the mantle substance from under the continent to the shelf and ocean floor area when the sea regression during the maximum of the Last Glacial Period. This induces downward movements of the continent coastal zone. Then, when an interglacial period come, as the sea basin fills with melt water from glaciers, the water load on the seabed and shelf increases, which leads to the return of mantle substance to the area under the continent, and the coastal zone begins to rise. This process depends on the viscosity of the mantle substance: the higher the viscosity, the longer it takes for the overflow (Fig. 3).

Figure 3 shows the relaxation curves computed using the SELEN 2.9 software [Spada, Stocchi, 2006, 2007; Spada et al., 2012] according to the method proposed by [Peltier, 1976]. The curves represent the dependence of the recovery time to the equilibrium state after the influence and the removal of the load on the planetary layers of the Earth. The relaxation curves show that at the highest viscosity of the mantle substance (model VM2c, Fig. 3 a), the relaxation time of the layers increases by almost half an order of magnitude in comparison with the model with the lowest viscosity (model VM2e, Fig. 3 b); it takes by several times longer for the earth's surface to return to isostatically balanced equilibrium.

In the case of the studied seas, the loading on the seabed in the area of the continental slope and shelf in the East Siberian Sea will go on with a lower load due to the obvious wider



Figure 2. Curves of the transgression course for the Laptev and the East Siberian seas depending on selected viscosity model of the Earth in accordance with the Table. The points, for which the curves of the transgression course are given, are shown with black squares in the Figure 1. For both seas, the points are chosen inside the bays to avoid the difference in transgression scenario at the cape and in the bay.

Earth's layer	Lithosphere thickness and viscosity values of the mantle layers			
	VM2a	VM2c	VM2e	VM2f
Lithosphere, km	50	50	50	50
Upper mantle, 10 ²¹ Pa·s	0.5	1.0	0.75	0.35
Transition layer, 10 ²¹ Pa·s	0.5	1.0	0.75	0.35
Lower mantle, 10 ²¹ Pa·s	2.7	10	3.5	2.0

Table. Earth models used in computations

Note. The parameters of the VM2a model proposed [Peltier, 1998] for modeling the restoration of isostatic equilibrium resulting from the changes in the volume of ice sheets (glacial isostatic adjustment – GIA) are taken as a basis.

width and a larger shelf area, correspondingly, in comparison with the shelf of the Laptev Sea, that will slow down the return of the mantle substance under the continental region at the coast of the East Siberian Sea. A delay in the return of mantle substance under the continental region will cause a lag in the rise of the coast, and the sea will leave the traces of coastal activity at the heights, which will be uplifted later, when the isostatic equilibrium is reached. As the result, the sea level traces during the period of reaching the eustatic transgression maximum (4 ka BP in our case) will be higher than the contemporary sea level.

This mechanism is confirmed by the simulation results (Fig. 2).

The curves with low values of the viscosity of the mantle substance show the excesses of the contemporary sea level at the East Siberian coast. Low viscosity values cause the hydroisostatic compensation, resulting in the ancient traces of the sea level being noted above modern levels. As for high values of mantle viscosity, as the computations show, there are



Figure 3. Isostatic relaxation spectra within the earth's layers according to the results of simulation in the SELEN 2.9 software, obtained for the VM2c (a) and VM2e (b) models. M0 corresponds to the mantle, C0 - to the core-mantle boundary, L0 - to the lithosphere, M1–M2 – to the borders of 670 and 470 km respectively, T1–T4 – to the layers with viscoelastic behavior.

no excesses of the contemporary sea level at the coast of the East Siberian Sea too (Fig. 2 b, VM2c).

The lack of sufficient data on the course of the postglacial transgression on the coast of the East Siberian Sea, based on the paleogeographic observations with absolute datings, does not make it possible to give preference to any of the used viscosity models, but if for the coast of the East Siberian Sea the process of hydroisostatic compensation has not yet finished (at low viscosity in the mantle segment), it can be expected that the dewatering of the coast and retreat of the sea may be the leading process in the near future.

Conclusion

The unique location relative to the areas of the ice sheets development and the great dif-

ference in the shelf width and continental slope of the Laptev and the East Siberian seas allow to confirm the presence of the continental levering effect for the continental coasts and its dependence on the shelf width and the continental slope according to the results of numerical simulation.

Obviously, it is necessary to continue the gathering of paleogeographic data on the postglacial transgression course at the coasts and shelves of the studied seas. With the availability of sufficient data, especially from the East Siberian Sea coast, the comparative simulation could allow to determine the rheological properties of the earth's layers more accurately, as well as to make more exact predictions and restore the postglacial transgression scenario and its dependence on the changes in ice sheets volume.

References

1. Anisimov M.A., Ivanova V.V., Pushina Z.V., Pitul'ko V.V. **2009.** Lagoon sediments of Jokhov Island: age, conditions of formation and meanings for paleogeographic reconstructions of the region of New Siberian Islands. *Izvestiia RAN, Ser. Geograficheskaia*, 5: 107–119. (In Russ.).

2. Baranskaya A.V. **2015.** *Rol' noveyshikh vertikal'nykh tektonicheskikh dvizheniy v formirovanii rel'yefa poberezhiy rossiyskoy Arktiki* [*The role of the latest vertical tectonic movements in formation of the relief of the Russian Arctic coasts*]: [Cand. diss. in geographic sciences]. Saint-Petersburg. (In Russ.).

3. Bol'shiyanov D.Yu., Makeyev V.M. **1995.** *Arkhipelag Severnaya Zemlya. Oledeneniye, istoriya razvitiya prirodnoy sredy* [*The Severnaya Zemlya Archipelago. Glaciation, history, environment*]. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 217 p. (In Russ.).

4. Bol'shiyanov D.Yu., Makarov A.S., Shnayder V., Shtof G. **2013.** *Proiskhozhdeniye i razvitiye del'ty r. Leny* [*Origin and development of the Lena River delta*]. Saint-Petersburg: AANII, 268 p. (In Russ.).

5. Clark J., Lingle C. **1979.** Predicted relative sea-level changes (18000 Years B.P. to present) caused by Late-Glacial retreat of Antarctic Ice Sheet. *Quaternary Research*, 11: 279–298. https://doi.org/10.1016/0033-5894(79)90076-0

6. Clark J., Farrell W., Peltier W. **1978.** Global changes in postglacial sea level: Numerical calculations. *Quaternary Research*, 9(3): 265–287. https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90033-9

7. Fairbridge R. **1961.** Eustatic changes in sea level. *Physics and Chemistry of the Earth*, 4: 99–185. https://doi.org/10.1016/0079-1946(61)90004-0

8. Gavrilov A.V., Romanovskii N.N., Hubberten H.-W. **2006.** Paleogeographic scenario of the postglacial transgression on the Laptev Sea shelf. *Kriosphera Zemli [Earth cryosphere*], 10(1): 39–50. (In Russ.).

9. Kaplin P.A., Selivanov A.O. **1999.** *Izmeneniye urovnya morey Rossii i razvitiye beregov: proshloye, nastoyashcheye, budushcheye = Sea-level changes and coasts of Russia: past, present, future.* Moscow: GEOS, 299 p. (In Russ.).

10. Klemann V., Heim B., Bauch H.A., Wetterich S., Opel T. **2015.** Sea-level evolution of Laptev Sea and East Siberian Sea since the last glacial maximum. *Arktos*, 1: 1(2015). https://doi.org/10.1007/s41063-015-0004-x

11. Makarov A.S. **2017.** *Kolebaniya urovnya arkticheskikh morey v golotsene* [*Holocene oscillations in the level of the arctic seas*]: [Doctor diss. in geographic sciences]. Saint-Petersburg. (In Russ.).

12. Makarov A.S., Bol'shiyanov D.Yu. **2011.** Kolebaniya urovnya arkticheskikh morey Rossii v golotsene [Holocene oscillations in the level of the Russia arctic seas]. In: *Problemy paleogeografii i stratigrafii pley-stotsena* [*Problems of Pleistocene paleogeography and stratigraphy*], 3. M.: Geograficheskiy fakul'tet MSU [MSU, Faculty of Geography], p. 315–320. (In Russ.)

13. Peltier W.R. **1976.** Glacial-Isostatic adjustment – II. The inverse problem. *Geophysical J. of the Royal Astronomical Society*, 46: 669–705.

14. Peltier W.R. **1998.** Postglacial variations in the level of the sea: Implications for climate dynamics and solid-Earth geophysics. *Reviews of Geophysics*, 36(4): 603–689. https://doi.org/10.1029/98rg02638

15. Shepard F.P. 1969. Morskaya geologiya [Marine geology]. Leningrad: Nedra, 462 p. (In Russ.).

16. Spada G., Sabadini R., Yuen D.A, Ricard Y. **1992.** Effects on postglacial rebound from the hard rheology in the transition zone. *Geophysical J. International*, 109(2), 683–700.

doi:10,1111/j.1365-246X.1992.tb00125.x.

17. Spada G., Stocchi P. **2006.** *The sea level equation: Theory and numerical examples.* Roma: Aracne, 96 p.

18. Spada G., Stocchi P. **2007**. SELEN: A Fortran 90 program for solving the "sea-level equation". *Computers and Geosciences*, 33(4): 538–562. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.08.006

19. Spada G., Melini D., Galassi G., Colleoni F. **2012.** *Modeling sea level changes and geodetic varia*tions by glacial isostasy: the improved SELEN code. http://arxiv.org/abs/1212.5061

20. Stocchi P., Spada G. **2007.** Glacio- and hydro-isostasy in the Mediterraneon Sea: Clark's zones and role of remote ice sheets. *Annals of Geophysics*, 50(6). https://doi.org/10.4401/ag-3054

21. Whitehouse P. **2009.** Glacial isostatic adjustment and sea-level change: State of the art report. *Technical Report*, TR-09-11.

About the Authors

BULGAKOV Rustam Faridovich (ORCID 0000-0001-9095-3785), Cand. sci. (Geography), researcher of the Laboratory of coastal geosystems, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, r.bulgakov@imgg.ru

AFANAS'EV Viktor Viktorovich (ORCID 0000-0002-2344-1269), Cand. sci. (Geography), head of the Laboratory of coastal geosystems, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, vvasand@mail.ru

УДК 550.42

Гидрогеохимическая характеристика проявлений грязевого вулканизма на острове Сахалин

© 2020 О.А. Никитенко*, В.В. Ершов

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: nikitenko.olga@list.ru

Резюме. На о. Сахалин традиционно выделяют четыре участка проявлений грязевого вулканизма, на каждом из которых имеется один или более эруптивных выходов различной морфологии. В данной работе рассмотрены результаты исследования региональных особенностей химического и изотопного (δ^{18} O и δ D) состава подземных вод, разгружающихся из всех известных здесь грязевых вулканов. На основе совокупного анализа современных и литературных данных установлено, что исследуемые воды неоднородны по своим геохимическим показателям. Наиболее существенно эта неоднородность проявляется для общей минерализации, средний показатель которой в водах разных грязевулканических проявлений варьирует от 0.1 до 22.5 г/л. Грязевулканические воды в регионе представлены также разными гидрохимическими типами, но наиболее распространены воды HCO,-Cl-Na состава. Изотопные характеристики свидетельствуют о том, что воды Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного грязевых вулканов формируются в результате смешения исходных седиментационно-погребенных морских вод с метеорными и дегидратационными водами. Одним из ведущих факторов метаморфизации этих вод является поступление больших количеств СО, в подводящие каналы грязевых вулканов, что способствует более интенсивному выщелачиванию алюмосиликатных водовмещающих пород и повышению содержания Na⁺ и Mg²⁺ в грязевулканических водах. По совокупности геолого-геохимических данных сделано предположение о том, что воды Дагинского и Лесновского грязевулканических проявлений не относятся к зрелым подземным водам глубинной циркуляции и в целом не являются типичными для грязевых вулканов. Температуры формирования вод Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного грязевых вулканов, рассчитанные по Mg–Li гидрохимическому геотермометру, варьируют от 51 до 105 °C, что соответствует интервалу глубин от 1.3 до 2.6 км. Температуры формирования вод Дагинских термоминеральных источников, рассчитанные по К-Мд геотермометру, составляют в среднем 70 °C, что соответствует залеганию водоносного пласта, питающего данную флюидную систему, на глубине 2.1 км.

Ключевые слова: грязевые вулканы, подземные воды, химический состав, стабильные изотопы, взаимодействие вода-порода-газ, Сахалин

Для цитирования: Никитенко О.А., Ершов В.В. Гидрогеохимическая характеристика проявлений грязевого вулканизма на острове Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 3, с. 321–350. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.321-335.336-350

For citation: Nikitenko O.A., Ershov V.V. Hydrogeochemical characteristic of mud volcanism manifestations on Sakhalin Island. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 321–350. (Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.321-335.336-350

Hydrogeochemical characteristic of mud volcanism manifestations on Sakhalin Island

Olga A. Nikitenko*, Valery V. Ershov

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: nikitenko.olga@list.ru

Abstract. There are four areas of mud volcanism traditionally set off on Sakhalin Island. Each of them is characterized by one or more eruptive mudflow seepage domains of different morphology. This article considers the results of a study of regional features of the chemical and isotopic (δ^{18} O and δ D) composition of groundwater discharging from all known mud volcanoes in the region. A pooled analysis of available literature data showed the studied waters to be heterogeneous in their geochemical parameters. This heterogeneity is most significantly manifested for the total mineralization, which average values vary from 0.1 to 22.5 g/l in the waters of different mud volcanic seepage domains. Mud volcanic waters

in the region are also represented by different hydrochemical types, but HCO_3 -Cl-Na waters are the most common. The isotopic characteristics testify the waters of the South Sakhalin, Pugachev, and Vostochny mud volcanoes to be formed as a result of mixing the original sea waters buried under sedimentation with meteoric and dehydration waters. One of the key factors in the metamorphization of these waters is the influx of large amounts of CO_2 into the channels of mud volcanoes, which contributes to more intensive leaching of aluminosilicate water-bearing rocks and leads to an increase in the content of Na⁺ and Mg²⁺ in mud volcanic waters. By the pooled geology and geochemical data, we made an assumption that the waters of Daginsky and Lesnovsky mud volcanic manifestations do not refer to mature groundwaters of deep circulation, thus being not generally typical for mud volcanoes. Water-formation temperatures of the South Sakhalin, Pugachev, and Vostochny mud volcanoes calculated using the Mg–Li hydrochemical geothermometer vary from 51 to 105 °C, which corresponds to depths range from 1.3 to 2.6 km. Water-formation temperatures of the Daginsky thermal and mineral springs calculated using the K–Mg geothermometer average 70 °C, which corresponds to the occurrence of an aquifer feeding this fluid system at a depth of 2.1 km.

Keywords: mud volcanoes, groundwater, chemical composition, stable isotopes, water-rock-gas interaction, Sakhalin Island

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Введение

Грязевой вулканизм является одной из форм проявления эндогенных процессов на поверхности Земли, которые обеспечивают фокусированную разгрузку подземных флюидов в разломных зонах земной коры. Как правило, грязевые вулканы формируются в осадочных бассейнах с большой мощностью осадочного чехла и обычно совмещаются с крупными нефтегазовыми месторождениями. Обязательным условием для развития грязевого вулканизма предполагается наличие разрывных нарушений, по которым осуществляется вертикальный перенос подземных флюидов [Алиев и др., 2015].

Одной из актуальных и наиболее сложных фундаментальных проблем при изучении процессов грязевого вулканизма является выяснение источников и механизмов генерации грязевулканического вещества. Решение этой проблемы представляется возможным на основе анализа закономерностей химического и изотопного состава жидких, твердых и газообразных продуктов грязевулканической деятельности. Геохимические исследования грязевых вулканов связаны также с решением ряда практических задач. Приуроченность грязевых вулканов к глубинным разломам земной коры позволяет изучать взаимосвязи флюидных систем с региональными сейсмотектоническими процессами [Каменев и др., 2019]. Кроме того, проявления грязевого вулканизма служат одним из критериев поиска нефтегазовых месторождений, а также рассматриваются в качестве значимого источника поступления парниковых газов в атмосферу [Ершов, Бондаренко, 2020].

География грязевого вулканизма охватывает более 40 стран [Алиев и др., 2015]. Наиболее масштабно грязевулканическая деятельность проявилась в Азербайджане и прилегающей акватории южного Каспия. В России грязевые вулканы известны на Керченском и Таманском полуостровах, а также в Западной Кубани и акваториях Азовского и Черного морей. Перечисленные регионы часто объединяют в Керченско-Таманскую грязевулканическую провинцию, которая является вторым крупным районом развития грязевого вулканизма в мире. Грязевые вулканы в России известны также на Дальнем Востоке – на о. Сахалин. Проведенный нами ранее сравнительный анализ вещественного состава продуктов деятельности грязевых вулканов Азербайджана и о. Сахалин показал, что помимо различий по морфологическим признакам и интенсивности пароксизмальной деятельности сахалинские вулканы несколько отличаются от азербайджанских и по геохимическому составу жидких, твердых и газообразных выбросов [Никитенко и др., 2018]. Более того, грязевые вулканы, расположенные на о. Сахалин, тоже сильно различаются между собой по морфологии, занимаемой площади, пароксизмальной и грифонно-сальзовой стадиям деятельности.

В целом о. Сахалин уникальное место для изучения грязевого вулканизма: структурно-

динамическая позиция острова в активной зоне перехода от континента к океану определяет наличие мощных осадочных толщ с нефтяными и газовыми залежами, многочисленных разрывных нарушений, высокую степень дислоцированности отложений, интенсивную современную сейсмотектоническую активность. Гидрогеохимические исследования грязевулканических проявлений о. Сахалин проводились в основном в 60–70-е годы прошлого века. В последнее десятилетие в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН подобные работы были возобновлены и получен ряд новых результатов с использованием современных инструментальных методов.

Целью данной работы является обобщение и анализ гидрогеохимических данных грязевых вулканов о. Сахалин для понимания закономерностей формирования изотопного и химического состава грязевулканических вод в регионе. Кроме того, мы полагаем, что геохимическая специфика грязевулканических проявлений в регионе, возможно, обусловлена выраженной неоднородностью геолого-тектонических условий зон их развития. Этот аспект также рассматривается в статье.

Гидрогеологическая и тектоническая характеристика районов исследования

На о. Сахалин традиционно выделяют четыре района проявления грязевого вулканизма: Южно-Сахалинский и Лесновский грязевые вулканы – на юге; вулкан Восточный и группа Пугачевских вулканов (Главный Пугачевский, Малый Северный, Малый Южный) – в центральной части, Дагинское грязевулканическое проявление – на севере. Районы проявления грязевого вулканизма на о. Сахалин находятся в разных геологотектонических условиях. При этом все грязевые вулканы локализуются в осадочных бассейнах вдоль крупных глубинных разломов земной коры [Геология СССР..., 1970].

Южно-Сахалинский грязевой вулкан по своей морфологии представляет собой вулкан в классическом его понимании. Это высокий холм формы усеченного конуса диаметром более 400 м в основании, сложенный глинистыми отложениями. Площадь выбросов свежей сопочной брекчии на этом вулкане составляет около 5 га. На вершине холма имеются группы грифонов и сальз, из которых активно выделяются вода, газ и сопочный ил. Периодически (с интервалом около 20 лет) происходят мощные извержения вулкана, после которых ландшафт местности существенно изменяется. Наиболее сильные извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана были зарегистрированы в 1959, 1979 и 2001 гг. [Мельников, Ершов, 2010]. Последнее извержение достаточно высокой мощности произошло весной 2020 г.

Пугачевские грязевые вулканы имеют форму плоских дисков и приурочены к общей для них заболоченной овально-округлой котловине размером 2 × 1.5 км. Каждые несколько лет здесь происходят извержения разной мощности, после которых образуются новые грязевые поля округлой формы. По имеющимся в литературе данным, на Главном Пугачевском вулкане с 1906 г. зарегистрировано 15 извержений – в 1906(?), 1911, 1929, 1933, 1934, 1935, 1948(?), 1952, 1961, 1967, 1988, 1996, 2002, 2003 и 2005 гг. [Ершов, Мельников, 2007]. Поскольку наблюдения за деятельностью Пугачевского грязевого вулкана нерегулярны, вероятно, некоторые извержения небольшой мощности могли быть не зафиксированы. Как видим, Пугачевский вулкан отличается от Южно-Сахалинского более частыми извержениями, мощность которых довольно различна. Наиболее крупные извержения на Пугачевском вулкане наблюдались в 1934 и 2005 гг., когда выбросами свежей сопочной брекчии была покрыта территория около 10 га. В периоды других извержений площадь выброшенной сопочной брекчии редко превышала 1 га. Стоит отметить также, что современная грифонно-сальзовая активность на Пугачевском вулкане существенно ниже, чем на Южно-Сахалинском.

Примерно в 4 км к север-северо-востоку от Пугачевских вулканов расположен влк. Восточный. В отличие от Южно-Сахалинского и Пугачевского, это довольно небольшое грязевулканическое проявление с гораздо меньшей активностью. Нет никаких достоверных сведений об извержениях этого вулкана. Поля свежей брекчии здесь отсутствуют, функционируют только несколько небольших сальз, расположенных в нескольких метрах друг от друга.

Тектонически Южно-Сахалинский, Восточный и группа Пугачевских вулканов приурочены к крупному Центрально-Сахалинскому разлому, который является границей

сочленения Западно-Сахалинского антиклинория и Центрально-Сахалинского синклинория. В центральной части Западно-Сахалинских гор обнажаются меловые породы, несогласно залегающие на палеозойско-мезозойском фундаменте. Восточнее Западно-Сахалинских гор неогеновые отложения несогласно перекрывают смятые в складки меловые отложения [Геология СССР..., 1970]. Грязевые вулканы здесь расположены в главном поле выхода на дневную поверхность меловых пород. В пределах этого поля меловая толща разреза расчленяется на красноярковскую, быковскую, найбинскую и айскую свиты. Для грязевых вулканов материнской является быковская свита, которая сложена однородными аргиллитами и глинистыми алевролитами [Мельников, Ильев, 1989]. Накопление осадков быковской свиты происходило в морских условиях. На протяжении сеноманского и туронского веков в пределах Западно-Сахалинской структурно-фациальной зоны располагался крупный морской бассейн, в котором образовалась толща осадочных отложений быковской свиты мощностью более 2000 м [Гидрогеология СССР..., 1972].

С позиции гидрогеологии данные грязевые вулканы находятся на границе Западно-Сахалинского гидрогеологического массива и Сусунайского гидрогеологического бассейна. В Западно-Сахалинском гидрогеологическом массиве преимущественно распространены безнапорные трещинные и трещинно-жильные воды. Водоносные комплексы приурочены к породам датско-туронского и сеноманского возраста. Водовмещающими породами сеноманского водоносного комплекса являются песчаники, часто туффитовые, реже гравелиты, алевролиты. Водоносный комплекс датских и туронских отложений сложен песчаниками с прослоями и линзами конгломератов, гравелитов и аргиллитов, встречаются участки с пластами углей. По химическому составу воды верхних водоносных горизонтов гидрокарбонатные (реже гидрокарбонатно-хлоридные и хлоридно-гидрокарбонатные) со смешанным катионным составом, пресные, с минерализацией менее 0.5 г/л. Трещинно-жильные воды глубокой циркуляции (вскрыты нефтепоисковой скважиной на глубине около 2 км) являются хлоридно-натриево-кальциевыми, а их минерализация составляет 33 г/л [Гидрогеология СССР..., 1972].

В Сусунайском межгорном бассейне, примыкающем на востоке к Центрально-Сахалинскому разлому, развиты водоносные комплексы, приуроченные к породам четвертичного, плиоценового и миоценового возраста. Воды верхнего четвертичного водоносного горизонта безнапорные, пресные, с минерализацией менее 0.5 г/л, преимущественно гидрокарбонатные, со смешанным катионным составом. Область распространения напорных подземных вод соответствует водоносным комплексам плиоценового, верхне- и среднемиоценового, а также нижнемиоценового возраста. Для плиоценового водоносного комплекса характерны гидрокарбонатно-натриевые воды (местами гидрокарбонатно-хлоридные), смешанные по катионам, с минерализацией 0.2-0.3 г/л. В нижележащих горизонтах, относящихся к более древним водоносным комплексам, развиты хлоридно-натриевые воды с повышенной минерализацией, достигающей 22 г/л [Гидрогеология СССР..., 1972].

Лесновский вулкан находится вблизи пос. Лесное в 3 км от берега Охотского моря в русле правого притока р. Очепуха. Это небольшое грязевулканическое проявление представлено несколькими неглубокими (20-30 см) сальзами диаметром около 5 м [Мельников, Ильев, 1989]. Извержение этого вулкана зарегистрировано только один раз – более 30 лет назад. В настоящее время грифонно-сальзовая деятельность на этом вулкане отсутствует. Лесновский грязевой вулкан находится в северной части Муравьевской низменности, расположенной между Сусунайским и Тонино-Анивским хребтами. В районе значительно распространены палеозойские и мезозойские отложения, на которых резко несогласно залегают неогеновые отложения, слагающие отдельные, небольшие по площади разобщенные поля [Геология СССР..., 1970]. Исходя из геологических данных [Мельников и др., 2008], максимальная мощность неогеновых отложений в районе Лесновского грязевого вулкана не превышает 800 м. На данной территории также установлены обнаженные участки верхнемеловых пород, выходящие из-под покрова неогеновых отложений, представленные найбинской, быковской и красноярковской свитами. В работе [Мельников, Ильев, 1989] сделано предположение, что материнской для Лесновского грязевого вулкана является все та же быковская свита. Маломощные отложения этой свиты установлены в обнажениях р. Подорожная в 10 км к югу от места разгрузки грязевого вулкана. В средне-нижнемиоценовых отложениях развиты гидрокарбонатно-хлоридные натриево-магниевые/ кальциевые воды с минерализацией около 0.1–0.2 г/л [Гидрогеология СССР..., 1972].

Дагинское грязевулканическое проявление сильно отличается от остальных грязевых вулканов о. Сахалин. Оно представляет собой группу небольших грифонов и сальз, диаметр которых составляет в основании, как правило, несколько десятков сантиметров. Эти грифоны и сальзы расположены на побережье Ныйского залива Охотского моря и периодически затапливаются приливом. Рядом – в пределах нескольких сотен метров к юго-западу – находится Дагинское термоминеральное месторождение, которое представлено на земной поверхности несколькими десятками высокодебитных горячих ключей. Сведения о какой-либо пароксизмальной деятельности на этом грязевулканическом участке отсутствуют.

Дагинский грязевулканический участок расположен в восточной части Северо-Сахалинской низменности и тектонически контролируется субмеридиональной Хоккайдо-Сахалинской разломной зоной. Ее нижний структурный ярус, вероятно, слагается породами палеогена и позднего мела, верхний - отложениями неогена, мощность которых достигает в прогибах 6-8 км [Геология СССР..., 1970]. Неогеновые отложения резко несогласно залегают на отложениях нижнего структурного яруса и подразделяются на мачигарскую, даехуриинскую, уйнинскую, дагинскую, окобыкайскую и нутовскую свиты. Все свиты, кроме средней части дагинской, морскими терригенными представлены песчано-алевритовыми осадками, тогла как средняя часть дагинской свиты состоит из пресноводных континентальных угленосных отложений. Грязевулканический участок приурочен к зоне тектонического нарушения северо-восточного простирания, развитого в горизонтах нутовской свиты плиоценового возраста, состоящей из мелкозернистых глинистых рыхлых песчаников. С гидрогеологической позиции Дагинское грязевулканическое проявление соответствует восточной части Северо-Сахалинского артезианского бассейна, в геологическом строении кото-

рого принимают участие рыхлые и слаболитифицированные отложения четвертичного, плиоценового и миоценового возраста общей мощностью до 2-8 км [Гидрогеология СССР..., 1972]. В пределах бассейна прослеживается четко выраженная гидрохимическая зональность. В основной области бассейна широко развиты пресные и солоноватые (до 3 г/л) гидрокарбонатно-натриевые воды. В восточной окраине бассейна в разрезе превалируют хлоридно-натриевые воды с минерализацией 12–28 г/л, в отдельных случаях встречаются менее минерализованные воды хлоридно-гидрокарбонатно-натриевого состава, в то время как зона пресных и солоноватых вод здесь имеет небольшую мощность [Гидрогеология СССР..., 1972].

Материалы и методы исследования

В работе обобщены и проанализированы результаты собственных исследований авторов 2015-2017 гг. по изотопному и химическому составу вод грязевых вулканов о. Сахалин, а также ранее опубликованные данные. В литературных источниках для Южно-Сахалинского грязевого вулкана изучены 13 проб [Ершов, Никитенко, 2017; 1978; Чернышевская, Лагунова, Гемп, 1958; Челноков и др., 2015; Шилов и др., 1961], для Пугачевского – 6 [Сирык, 1968; Ильев и др., 1970; Лагунова, Гемп, 1978], для влк. Восточный – 1 [Сирык, 1968], для Лесновского вулкана – 1 ГМельников, Ильев, 1989], для Дагинского грязевулканического проявления – 1 проба [Цитенко, 1961а]. Немногочисленные литературные данные, касающиеся геохимии грязевулканических вод о. Сахалин, относятся преимущественно к 60-70-м гг. XX в. Они отражают в основном макрокомпонентный состав вод, в то время как микроэлементный и изотопный (δ^{18} O и δ D) состав для вод некоторых вулканов вообще не определялся. Химикоаналитические определения этого периода характеризуются довольно широким разбросом значений как для общей минерализации, так и для многих компонентов. Следовательно, встает вопрос о представительности этих проб. Например, для вод Пугачевских грязевых вулканов отмечается очень высокий коэффициент вариации для общей минерализации – 96 %. Наши исследования и мировой опыт гидрогеохимических исследований грязевых вулканов не подтверждают такую низкую соленость грязевулканических вод.

В этой связи данные из работы [Сирык, 1968] по образцам вод Пугачевского вулкана с минерализацией менее 1 г/л не учитывались нами при анализе. Кроме того, для некоторых проб обнаружены достаточно большие погрешности в количественном химическом анализе (или же опечатки в публикации), поскольку при наличии в результатах анализа всех главных анионов и катионов эти пробы не отвечают основополагающему принципу электрорасхождение нейтральности. Наибольшее между суммой эквивалентов анионов и катионов (18.5%) установлено для одной пробы Пугачевского грязевого вулкана [Лагунова, Гемп, 1978]. Однако, несмотря на высокое расхождение в электронейтральности, концентрации основных анионов и катионов в этой пробе во многом соответствуют типичному составу вод Пугачевского вулкана. Поэтому данную пробу мы не исключали из общего массива данных, но не учитывали при анализе и построении графических зависимостей между различными гидрогеохимическими показателями исследуемых вод, поскольку она вносит сильные искажения при формировании линии тренда.

Очевидно, что имеющиеся сведения о геохимии грязевулканических вод о. Сахалин требовали уточнения и проведения дополнительных исследований. Авторами в последнее десятилетие выполнен большой объем гидрогеохимических исследований грязевых вулканов. Основная часть их проведена на Южно-Сахалинском вулкане – 46 проб (полевой сезон 2015 г.), группе Пугачевских вулканов – 5 проб (сентябрь 2016 и август 2017 г.) и на влк. Восточный – 3 пробы (август 2017 г.).

Анализ химического состава исследуемых вод выполнен в ЦКП ИМГиГ ДВО РАН. Концентрации анионов (Cl⁻, Br⁻, SO₄²⁻) и катионов (Li⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) определялись методом ионной хроматографии, концентрация HCO₃⁻ – титриметрическим методом. Определения изотопного состава (δ¹⁸O, δD) грязевулканических вод проводились в Ресурсном центре СПбГУ «Геомодель» методом инфракрасной лазерной спектрометрии.

Результаты и обсуждение

Гидрохимические исследования показали, что воды грязевых вулканов о. Сахалин весьма неоднородны по химическому составу (рис. 1). Эта неоднородность проявляется прежде всего в довольно сильных различиях по общей минерализации. По результатам наших опробований, наиболее высокая минерализация характерна для вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана – в среднем 22.5 г/л. Для влк. Восточный средний показатель минерализации 11.1 г/л, для вод Пугачевских грязевых вулканов – 11.2 г/л. Исходя из литературных данных, минерализация вод Восточного и Южно-Сахалинского грязевых вулканов согласуется с показателями прошлых лет. Для вод же Пугачевских грязевых вулканов, по данным исследований 1960–1970-х годов, средний показатель минерализации 6.2 г/л, это практически в два раза меньше наших значений (рис. 1). Такой низкий показатель минерализации, вероятно, обусловлен разбавлением грязевулканических вод пресными атмосферными осадками, так как общее содержание растворенных солей в пробах Пугачевских грязевых вулканов в тот период значительно варьирует, от 2.6 до 12.5 г/л [Сирык, 1968; Ильев и др., 1970; Лагунова, Гемп, 1978]. Наиболее низкой минерализацией, по литературным данным, характеризуются воды Дагинского (3.3 г/л) и Лесновского (0.1 г/л) грязевых вулканов [Цитенко, 1961а; Мельников, Ильев, 1989].

Кислотно-щелочные свойства вод сахалинских грязевых вулканов варьируют в относительно небольших пределах: значения рН для вод Южно-Сахалинского вулкана находятся в диапазоне от 7.0 до 9.2, для Пугачевского – от 7.9 до 8.7, для вулкана Восточный – от 7.8 до 8.2. По соотношению основных ионов воды грязевых вулканов о. Сахалин относятся к разным гидрохимическим типам (по классификации С.А. Щукарева). Воды Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного вулканов гидрокарбонатно-хлоридно-натриевые, воды Дагинского имеют четко выраженный хлоридно-натриевый состав, Лесновского – гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатный натриево-магниевый.

Наблюдаемая неоднородность химического состава грязевулканических вод о. Сахалин, вероятно, определяется исходным составом материнского грязевулканического вещества. Прежде всего это может быть обусловлено приуроченностью грязевых вулканов к разным водоносным комплексам, которые различаются вещественным составом водовмещающих пород, гидрохимической спецификой, а также скоростью водообмена.

Химический состав вод Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного грязевых вулканов свидетельствует об их разгрузке с достаточно больших глубин. Воды Лесновского вулкана являются фактически ультрапресными и по своим гидрохимическим характеристикам соответствуют водам зоны выветривания. Мы полагаем, что формирование вод Лесновского вулкана происходит при активном участии вод зоны свободного водообмена. Вообще говоря, химический состав вод, разгружающихся на данном участке, ставит под вопрос принадлежность рассматриваемого природного объекта к грязевым вулканам. Однако решение этого вопроса требует дополнительного изучения. Что же касается химического состава вод Дагинского грязевулканического проявления, то приуроченность этого объекта к прибрежной части Ныйского залива обусловливает значительное влияние морских вод на гидрогеологический режим вулкана. В работах [Цитенко, 1961а, 1961b] указано, что изменение минерализации и химического состава вод в пределах Дагинского участка обусловлено разной степенью смешения слабоминерализованных вод глубинных горизонтов, характеризующихся повышенным содержанием гидрокарбонат-иона, с морскими водами. При этом предполагается,



Рис. 1. Пространственные различия в химическом составе вод грязевулканических проявлений о. Сахалин с указанием геологических условий: 1 – четвертичная система, 2 – палеоген-неогеновая система, 3 – меловая система, 4 – палеозой-мезозойская система; 5 – основные разрывные дислокации; 6 – стратиграфические границы. Для показателей химического состава показаны средние значения; n – количество проб; звездочкой обозначены данные собственных исследований.

что «грязевые вулканчики и горячие ключи имеют одну генетическую природу» [Цитенко, 1961а, с. 174]. Действительно, грязевулканические и термоминеральные воды на Дагинском участке схожи по своему химическому составу [Жарков, 2018; Цитенко, 1961a, 1961b] (рис. 1). По соотношению основных компонентов и те, и другие относятся к хлоридно-натриевому типу. Заметим, что термальные воды здесь очень разнородны по своей минерализации – от 1.4 до 23.7 г/л [Жарков, 2018; Цитенко, 1961а]. Территориально Дагинское гидротермальное поле подразделяют на три участка разгрузки минеральных вод – Северный, Центральный и Южный [Жарков, 2018; Сахаров и др., 2020]. По данным [Жарков, 2018], грязевые грифоны располагаются на Северном участке, где минерализация термальных вод от 2.0 до 8.5 г/л, что в целом соответствует обычной минерализации вод из грязевых грифонов. Поэтому мы также склонны полагать, что воды из грифонов и термальных источников на Дагинском участке имеют общий генезис. Отметим, что химический состав Дагинских терм изучен в большей степени. В случае отсутствия сведений о каких-либо гидрохимических показателях для вод из Дагинских грязевых грифонов мы с соответствующими оговорками будем использовать данные, полученные для термальных источников.

Неоднородность химического состава грязевулканических вод о. Сахалин может быть обусловлена также различной газогеохимической специализацией разных районов острова. Согласно работе [Шакиров и др., 2012], на о. Сахалин выделяются две основные газогеохимические зоны: метановая и углекисло-метановая, которые различаются тектоническим строением и источниками углеводородов. В северо-восточной и восточной частях острова газопроявления представлены главным образом метаном, углекислый газ в них содержится в очень низких концентрациях. Так, для Дагинского грязевулканического участка основным компонентом свободно выделяющихся газов является СН₄. В западной и юго-западной частях острова в газопроявлениях возрастает доля углекислого газа, вплоть до того, что он может являться преобладающим компонентом. Самые высокие концентрации СО, наблюдаются на Южно-Сахалинском вулкане – до 95 об. %. На вулканах Пугачевский и Восточный концентрация СО, достигает 40 об. %.

Таким образом, на о. Сахалин наблюдаем тенденцию к возрастанию концентрации CO₂ в составе свободных газов грязевых вулканов в южном направлении. В этом же направлении отмечается изменение гидрохимического типа грязевулканических вод от хлоридно-натриевого к гидрокарбонатно-хлоридно-натриевому.

Газонасыщенность подземных вод обусловливает направленность процессов взаимодействия в системе «вода–порода–газ», что приводит к существенным литолого-гидрогеохимическим изменениям компонентов этой системы. Известно, что обогащенность подземных вод CO₂ является главным фактором, определяющим интенсивность процессов гидролиза водовмещающих пород. Этот процесс сопровождается не только образованием вторичной минеральной фазы, но и поступлением в раствор подвижных катионов (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) из исходных минералов, а также образованием HCO₃⁻ [Шварцев, 1996].

Для вод грязевых вулканов о. Сахалин характерна сильная корреляционная зависимость между концентрациями Na⁺ и Cl⁻ (рис. 2). При этом фигуративные точки на рис. 2 формируют два разных линейных тренда, угол наклона которых сильно различается. На этом основании коэффициент корреляции между концентрациями Na⁺ и Cl- был рассчитан для каждой группы фигуративных точек. Так, для вод Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного грязевых вулканов коэффициент корреляции Пирсона между Na+ и Cl- составляет 0.95. Для термальных и грязевулканических вод Дагинского участка этот коэффициент практически равен единице. Необходимо отметить, что точка, соответствующая Лесновскому грязевому вулкану, занимает промежуточное положение между двумя трендами, поэтому данная проба была исключена при расчете корреляционных зависимостей. Из расчетов также исключена одна проба из Пугачевского грязевого вулкана по причине несоблюдения принципа электронейтральности. Линейную корреляцию между Na⁺ и Cl⁻ можно рассматривать как один из признаков того, что основным источником водной фазы грязевулканических флюидов являются седиментационно-погребенные морские воды, которые в дальнейшем испытывали разбавление пресными водами. Отметим, что положительная корреляционная связь между Na⁺ и Cl⁻ наблюдается также для вод наземных грязевых вулканов в других регионах мира [Liu et al., 2009; Ray et al., 2013; и др.]. Однако фигуративные точки на диаграмме Na⁺ – Cl⁻, соответствующие Южно-Сахалинскому, Пугачевскому и Восточному грязевым вулканам, находятся выше линии разбавления морской водой, т.е. эти воды существенно обогащены Na⁺. Соответственно, отношение Na/Cl для вод большинства грязевых вулканов о. Сахалин значительно превышает этот показатель для морской воды (который равен 0.55). Для вод Южно-Сахалинского вулкана отношение Na/Cl составляет в среднем 1.5, для Пугачевского – 1.7, для Восточного – 2.2. Только в водах Дагинского грязевулканического участка отношение Na/Cl довольно близко к морской воде – около 0.7. Для Лесновского вулкана это отношение равно 1.1, но воды этого вулкана низкоминерализованные ультрапресные, основным источником их пополнения, вероятно, являются воды атмосферно-инфильтрационного генезиса. Формирование химического состава этих вод происходит в результате процессов выветривания – разрушения горных пород при инфильтрации атмосферных осадков. При разложении силикатов и алюмосиликатов в водный раствор поступает ряд подвижных катионов, включая Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ [Дривер, 1985]. Способность вод к выщелачиванию водовмещающих пород повышается за счет присутствия в них растворенного углекислого газа (атмосферного и/или микробиального происхождения). Часть растворенного СО, при взаимодействии воды с породами превращается в НСО₂⁻.

Зависимость между концентрациями Na⁺ и Cl- в грязевулканических водах свидетельствует о поступлении этих элементов в грязевые вулканы из одного источника – в данном случае, как мы полагаем, из морской воды. Эта связь хорошо сохраняется в довольно широком диапазоне концентраций в процессах испарительного концентрирования грязевулканических вод или их разбавления метеорными водами. В этих случаях концентрации всех компонентов химического состава вод будут положительно коррелировать не только с содержанием ионов Cl- (и, таким образом, зависеть от общей минерализации), но и между собой. Однако более детальные исследования позволяют понять, что корреляционная связь между концентрациями Na⁺ и Cl⁻ для вод грязевых вулканов может



Рис. 2. Соотношение концентраций СІ- и Na⁺ в водах сахалинских грязевых вулканов (1 – Южно-Сахалинский, 2 – Пугачевский, 3 – Восточный, 4 – Лесновский, 5 – Дагинский) и Дагинских термальных источников (6). Сплошная линия – гипотетический тренд разбавления морской воды. Пунктирные линии – линейные регрессионные зависимости, построенные по методу наименьших квадратов (а – для Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного вулканов, b – для термальных и грязевулканических вод Дагинского участка). Одна проба из Пугачевского вулкана исключена из расчетов при построении тренда (см. пояснения в тексте).

иметь разную силу или вовсе отсутствовать. Так, в ходе гидрогеохимического мониторинга, проведенного нами на Южно-Сахалинском грязевом вулкане в 2015 г., было установлено, что для грязевулканических вод, не подвергшихся разбавлению атмосферными осадками, коэффициент корреляции между содержаниями Na⁺ и Cl⁻ близок к нулю [Никитенко и др., 2017]. Тогда как при разбавлении грязевулканических вод метеорными водами наблюдается положительная зависимость между Na⁺ и Cl⁻. Особенностью этих наблюдений был отбор большого количества проб в течение нескольких месяцев. Причем концентрации основных анионов и катионов в этих пробах варьировали в небольшом диапазоне, поскольку пробы были собраны на одном и том же объекте. Результаты мониторинга позволяют говорить о том, что Na⁺ дополнительно поступает в грязевулканические воды из какого-то другого источника. Следовательно, процессы разбавления или концентрирования могут затруднять идентификацию других процессов, участвующих в формировании химического состава грязевулканических вод.

Отношение Na/Cl в водах грязевых вулканов имеет отчетливую положительную корреляцию с HCO₃/Cl, коэффициент корреляции Пирсона равен 0.96 (рис. 3). Данная зависимость показывает, что для вод с наиболее

низким содержанием HCO₃⁻ отношение Na/Cl довольно близко к значению этого показателя для морской воды. Это согласуется с гипотезой о том, что именно воды морского генезиса являются исходным источником для грязевулканических вод. Совместное увеличение концентраций Na⁺ и HCO₃⁻ в грязевулканических водах является следствием процессов метаморфизации исходных седиментационных морских вод. Мы полагаем, что рост концентрации НСО₃⁻ происходит за счет поступления неорганического углерода (прежде всего растворения СО₂). Насыщенность грязевулканических вод углекислым газом усиливает их агрессивность к водовмещающим натрийсодержащим алюмосиликатным породам (например, к альбиту – NaAlSi₂O₂), в результате чего происходит интенсивное выщелачивание Na⁺ из водовмещающих пород и его совместное накопление с НСО₃⁻ в водном растворе.

Концентрация Mg²⁺ в водах грязевых вулканов о. Сахалин, предположительно, также отражает разную степень метаморфизации грязевулканических вод в регионе. Воды Южно-Сахалинского грязевого вулкана обогащены Mg²⁺ по сравнению с остальными вулканами: средний показатель отношения Mg/Cl для них 0.05. Концентрации Mg²⁺ в водах Пугачевского, Восточного и Дагинского грязевых вулканов сопоставимы: средний показатель Mg/Cl для них около 0.02. Наблюдаемое истощение грязевулканических вод Mg²⁺ по сравнению с морской водой (для нее



Рис. 3. Зависимость отношений Na/Cl и HCO₃/Cl в водах сахалинских грязевых вулканов (1 – Южно-Сахалинский, 2 – Пугачевский, 3 – Восточный, 4 – Лесновский, 5 – Дагинский) и Дагинских термальных источников (6). Пунктиром показана линейная регрессионная зависимость, построенная по методу наименьших квадратов. Одна проба из Пугачевского вулкана исключена из расчетов при построении тренда (см. пояснения в тексте).

отношение Mg/Cl составляет 0.07), как мы полагаем, обусловлено процессами преобразования грязевулканических вод в результате взаимодействия в системе «вода–порода–газ», в частности процессами осаждения карбонатных минералов и ионного обмена с глинами.

Концентрация Ca²⁺ в грязевулканических водах в основном регулируется карбонатным равновесием. Термодинамические расчеты показывают, что воды Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного грязевых вулканов сильно пересыщены по СаСО₂. Значения индекса насыщения SI (saturation index) составляют в среднем 1.5; 1.4-1.6; 1.5-1.7 соответственно. Нами также было экспериментально установлено осаждение карбоната кальция в этих водах [Никитенко, 2019]. Как следствие, процесс осаждения СаСО, способствует выведению Ca2+ из водного раствора с новообразующейся минеральной фазой. Быстро изменяющиеся параметры карбонатной системы: pH, концентрации HCO₃⁻ и CO₃²⁻ - определяют интенсивность процесса осаждения карбоната кальция в грязевулканических водах. В связи с этим содержание Ca²⁺ в водах грязевых вулканов о. Сахалин может довольно сильно изменяться в пределах даже одного вулкана и не формирует четкой дифференциации грязевулканических вод в регионе по данному показателю.

Концентрации таких микрокомпонентов, как литий и бор, в водах разных грязевых вулканов региона различаются (рис. 4). На диаграмме Cl–B–Li вулканы хорошо дифференцированы. При этом поля Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного вулканов располагаются достаточно близко между собой и характеризуются повышенным содержанием лития и бора относительно морской воды. Тогда как поле Дагинских термоминеральных источников обособлено от них и расположено ближе к точке морской воды. По результатам наших опробований, концентрация лития в водах сахалинских вулканов составляет от 0.2 до 7.3 мг/л, бора – от 210 до 360 мг/л. Наибольшее содержание лития наблюдается в водах Южно-Сахалинского вулкана, бора – в водах влк. Восточный. Повышенные концентрации бора специфичны для вод не только сахалинских, но и большинства грязевых вулканов мира [Mazzini, Etiope, 2017]. Например, в водах вулканов Керченского п-ова концентрация бора может достигать 1636 мг/л [Sokol et al., 2019]. Считается,

что обогащение грязевулканических вод бором происходит в результате его десорбции из глинистых минералов в процессе превращения смектита в иллит [Лаврушин и др., 2015; Hensen et al., 2004; Sokol et al., 2019]. По всей видимости, наблюдаемые вариации содержания бора в водах грязевых вулканов о. Сахалин отражают разную степень постседиментационных преобразований, происходящих в системе «вода-порода-газ».

Для оценки термодинамических условий формирования вод грязевых вулканов о. Сахалин применялись гидрохимические геотермометры – полуэмпирические зависимости, которые связывают концентрации некоторых компонентов химического состава и температуру подземных вод. Для получения более надежных температурных оценок использовалось несколько геотермометров: Mg-Li, Na-Li, K-Na и K-Mg [Giggenbach, 1988; Kharaka, Mariner, 1989]. Необходимо отметить, что значения глубинных температур формирования вод грязевых вулканов, получаемые из расчета по гидрохимическим геотермометрам, необходимо считать ориентировочными, поскольку их использование не всегда дает однозначные результаты. Выполненные расчеты показывают, что температуры формирования вод грязевых вулканов на о. Сахалин несколько различаются (см. таблицу).

Пластовые температуры для влк. Восточный составляют, по данным разных геотермометров, от 51 до 55 °С. Аналогичные оценки для Южно-Сахалинского и Пугачевского



Рис. 4. Соотношение концентраций (в мг/л) Cl, Li и B в водах сахалинских грязевых вулканов (1 – Южно-Сахалинский, 2 – Пугачевский, 3 – Восточный) и Дагинских термальных источников (4). Для сравнения показаны концентрации соответствующих компонентов в морской воде (5).

вулканов заметно выше: в диапазоне 81–151 и 69-136 °С соответственно. Для расчета температур формирования вод грязевых вулканов наиболее подходящим считается Mg-Li геотермометр, который был специально разработан для вод осадочных бассейнов широкого диапазона минерализации [Лаврушин, 2015]. Исходя из значений температур, полученных по Mg-Li геотермометру, и величины геотермического градиента на исследуемой территории [Веселов и др., 1997], были сделаны оценки глубины залегания грязевулканических камер. Так, средняя глубина залегания резервуаров, из которых осуществляется водное питание, составляет для Южно-Сахалинского вулкана около 2.6 км, для Пугачевского – 2.5 км, для влк. Восточный – 1.3 км.

Пластовые температуры для вод Дагинских термоминеральных источников по разным геотермометрам определены в диапазоне от 65 до 100 °С (см. таблицу). Наиболее подходящими для вод гидротермальных систем считаются K-Mg и Na-K геотермометры [Giggenbach, 1988]. Глубинные температуры формирования вод Дагинских термоминеральных источников, рассчитанные по К-Мд геотермометру, составляют в среднем 70 °C, по Na–K геотермометру – 100 °C. Интерпретируя разницу в показаниях, следует учитывать, что Na-K геотермометр обычно используется для оценки пластовых температур свыше 150 °С [Kharaka, Mariner, 1989]. Кроме того, температуры, рассчитанные по K-Mg геотермометру, следует считать более надежными, поскольку равновесное состояние концентраций К и Mg в термальных водах достигается гораздо быстрее, чем концентраций Na и K, в результате чего K-Mg

Таблица. Оценки температур формирования вод сахалинских грязевых вулканов и Дагинских термальных источников по гидрохимическим геотермометрам

Геотермометр	Температура, °С				
	1	2	3	4	
Mg–Li	105	102	51	65	
Na–K	113	82	55	100	
K–Mg	81	69	55	70	
Na–Li	151	136	53	91	

Примечания. 1, 2 и 3 – Южно-Сахалинский, Пугачевский и Восточный грязевые вулканы соответственно; 4 – Дагинские термальные источники. По каждому геотермометру представлены средние значения расчетных температур.

The material is available under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY. 4.0) геотермометр быстрее реагирует на изменения пластовых температур [Giggenbach, 1988]. В соответствии с температурами, полученными по К-Мg геотермометру, и величиной геотермического градиента на исследуемой территории [Штейн, 1962] формирование термоминеральных вод Дагинского месторождения происходит на глубине 2.1 км.

Изотопный состав вод грязевых вулканов о. Сахалин до недавнего времени был изучен очень слабо. Нами получены изотопные определения δ^{18} О и δ D для Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного грязевых вулканов [Ершов, 2017, 2018]. Для вод Лесновского и Дагинского грязевулканических проявлений изотопные определения отсутствуют. Предполагая общий генезис грязевулканических и термоминеральных вод на Дагинском участке и, как следствие, схожие изотопные показатели для этих вод, в данной работе мы используем изотопные характеристики Дагинских термоминеральных источников из работы P.B. Жаркова [2008].

Изотопный состав вод Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного грязевых вулканов существенно отличается от состава метеорных и морских вод (рис. 5). Диапазон вариаций значений δ^{18} О в основном составляет от +1.0 до +7.2 ‰ SMOW, а значения δ D колеблются в интервале от -36.0 до -15.0 ‰ SMOW. Видно, что по изотопному составу воды этих вулканов различаются незначительно и образуют практически единое поле на диаграмме δ^{18} O- δ D. Отметим, что характерные значения изотопных показателей вод большинства грязевых вулканов мира находятся в интервалах (-1 +7) ‰



Рис. 5. Изотопный состав вод сахалинских грязевых вулканов (1 – Южно-Сахалинский, 2 –Пугачевский, 3 – Восточный), Дагинских термальных источников (4) и стандартной морской воды (SMOW – standard mean ocean water) (5).

для δ¹⁸О и (-30...-10) ‰ для δD [Никитенко, Ершов, 2017].

Содержания δ^{18} О и δ D свидетельствуют, что воды перечисленных грязевых вулканов о. Сахалин в основном формируются в результате смешения исходных седиментационно-погребенных морских вод с метеорными и дегидратационными водами. Напомним, что изотопно-тяжелые дегидратационные воды выделяются при трансформации глинистых минералов в области высоких температур и давлений.

Дагинские термоминеральные источники существенно отличаются по своим изотопным показателям от перечисленных выше грязевых вулканов о. Сахалин. Содержания δ^{18} О и δ D в термальных водах Дагинского месторождения находятся в интервалах (-15.3...-14.1) и (-106.8...-101.7) ‰ SMOW соответственно, что указывает на метеорное происхождение этих вод. Кроме того, изотопный состав изливающихся термоминеральных вод практически идентичен изотопному составу грунтовых вод в данном районе [Жарков, 2008].

Существенные гидрогеохимические отличия Дагинского грязевулканического проявления от Южно-Сахалинского и Пугачевского грязевых вулканов позволяют предположить, что данное водогрязепроявление нельзя относить к грязевым вулканам. Ранее авторами работы [Сорочинская и др., 2008] уже было предложено считать Дагинское водогрязепроявление локальной гидротермальной системой на том основании, что оно отличается от Южно-Сахалинского и Пугачевского грязевых вулканов по изотопному и химическому составу свободных газов, элементному и минералогическому составу выделяемой грязевой массы. Причем источником твердых выбросов являются, вероятно, молодые неогеновые глины. Кроме того, здесь нет типичных для грязевых вулканов взрывоподобных извержений и образующихся после них полей сопочной брекчии.

Заключение

По результатам исследований установлено, что грязевулканические воды на о. Сахалин весьма неоднородны по химическому составу. Эта неоднородность проявляется в первую очередь в минерализации подземных вод. Средний показатель для разных грязевулканических проявлений варьирует

Материал доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (СС ВҮ. 4.0) от 0.1 до 22.5 г/л. Наиболее высокая соленость свойственна водам Южно-Сахалинского вулкана, а самая низкая – водам Дагинского и Лесновского грязевулканических проявлений. Воды сахалинских грязевых вулканов относятся также к разным гидрохимическим типам. Южно-Сахалинский, Пугачевский и Восточный вулканы выносят на поверхность гидрокарбонатно-хлориднонатриевые воды, тогда как в пределах Дагинского грязевулканического участка разгружаются воды хлоридно-натриевого состава, а воды Лесновского вулкана характеризуются гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатным натриево-магниевым составом. Наблюдаются различия и по содержанию микроэлементов в грязевулканических водах - таких как литий и бор. Этими микроэлементами богаты воды Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного грязевых вулканов. Указанная гидрогеохимическая неоднородность грязевулканических вод на о. Сахалин определяется, вероятно, как исходным составом материнского грязевулканического вещества, так и геолого-тектоническими условиями районов грязевого вулканизма.

С помощью Mg–Li, Na–K, K–Mg и Na–Li гидрохимических геотермометров сделаны оценки температур формирования грязевулканических вод о. Сахалин. Согласно Mg–Li геотермометру, для Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного грязевых вулканов характерны пластовые температуры от 51 до 105 °C, а для Дагинских термоминеральных источников, согласно К–Mg геотермометру, – в среднем 70 °C. Исходя из региональных геотермических градиентов, глубина залегания водоносных пластов, питающих эти флюидные системы, составляет первые единицы километров.

Совместный анализ изотопного и химического состава вод Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного грязевых вулканов указывает на то, что источником водного питания для этих вулканов являются глубинные воды морского генезиса с разной степенью постседиментационных изменений. Одним из ведущих факторов метаморфизации седиментационно-погребенных исходных морских вод является поступление в грязевые вулканы водорастворимых форм неорганического углерода (в первую очередь СО₂). Насыщенность грязевулканических вод СО, усиливает их агрессивность к водовмещающим алюмосиликатным породам, что приводит к повышению содержания некоторых химических элементов в грязевулканических водах (в частности Na⁺ и Mg²⁺).

Гидрогеохимические данные свидетельствуют о том, что воды Дагинского и Лесновского грязевулканических проявлений нельзя отнести к зрелым водам глубинной циркуляции, которые длительное время взаимодействуют с вмещающими породами при достаточно высоких температурах и давлениях. Воды этих флюидных систем по своим параметрам – изотопному составу (δ^{18} O и δD), минерализации, содержанию специфичных микроэлементов – не соответствуют водам подавляющего большинства грязевых вулканов мира. В то же время для вод Южно-Сахалинского, Пугачевского и Восточного вулканов такое соответствие наблюдается. Вероятно, источники водного питания Дагинского и Лесновского грязевулканических проявлений располагаются в верхних структурных этажах зоны свободного водообмена.

Эти грязевулканические проявления также весьма своеобразны по своей морфологии. В частности, Южно-Сахалинский и Пугачевский вулканы формируют специфические грязевулканические ландшафты, характеризующиеся, например, наличием полей сопочной брекчии или растительной зональности в направлении от эруптивного центра к периферии вулкана. Лесновский же вулкан никак не выражен в рельефе или в ландшафтных обстановках.

Учитывая ультрапресный состав вод Лесновского вулкана, мы полагаем, что они представляют собой инфильтрационные воды, т.е. имеют метеорный генезис. Поэтому мы склонны думать, что данная флюидная система не должна считаться грязевулканическим проявлением. Пароксизмальная деятельность этой флюидной системы, зафиксированная в 1986 г., представляет собой, вероятно, локальный сброс пластового давления в верхнем водоносном горизонте (например, путем гидроразрыва). Однако необходимо учитывать, что к настоящему времени данные о химическом составе разгружаемых здесь вод получены только для одной пробы. Поэтому для более однозначных и достоверных выводов по этому вопросу требуется проведение дополнительных исследований. Скорее всего, также нельзя относить к грязевулканическим проявлениям и Дагинские грязевые грифоны. Результаты совокупного анализа геологических и гидрогеохимических данных показывают существенные отличия данного водогрязепроявления от Южно-Сахалинского и Пугачевского грязевых вулканов.

Таким образом, до появления каких-либо новых геолого-геохимических данных мож-

но говорить о том, что на о. Сахалин всего два района проявления грязевого вулканизма: один на юге – Южно-Сахалинский вулкан, а второй в центральной части – вулкан Восточный и группа Пугачевских вулканов.

Список литературы

1. Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Дадашев Ф.Г., Рахманов Р.Р. 2015. Атлас грязевых вулканов мира. Баку: Nafta-Press, 322 с.

2. Веселов О.В., Соинов В.В. **1997**. Тепловой поток Сахалина и Южных Курильских островов. В кн.: Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т. 4. Структура и вещественный состав осадочного чехла северо-запада Тихого океана. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 153–176.

3. Геология СССР. Т. 32. Остров Сахалин. Геологическое описание. 1970. М.: Недра, 432 с.

4. Гидрогеология СССР. Т. 34. Остров Сахалин. 1972. М.: Недра, 344 с.

5. Дривер Дж. 1985. Геохимия природных вод: пер. с англ. М.: Мир, 440 с.

6. Ершов В.В. **2017**. Особенности вещественного состава продуктов деятельности Пугачевского грязевого вулкана (о-в Сахалин). В кн.: Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVII Всерос. молодеж. конф. с участием исследователей из других стран, 22–28 мая 2017, Иркутск. Иркутск: Ин-т земной коры СО РАН, 88–89.

7. Ершов В.В. **2018**. Изотопный и химический состав вод грязевого вулкана Восточный (о. Сахалин). В кн.: *Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы третьей Всерос.* науч. конф. с междунар. участием, 20–25 авг. 2018, Чита. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 284–287.

8. Ершов В.В., Бондаренко Д.Д. **2020**. Характеристика изотопного и химического состава газов, выбрасываемых грязевыми вулканами из разных регионов мира. *Геоэкология*. Инженерная геология. *Гидрогеология*. *Геокриология*, 3: 23–35. http://dx.doi.org/10.31857/S0869780920030029

9. Ершов В.В., Мельников О.А. **2007**. О необычном извержении Главного Пугачевского газоводолитокластитового («грязевого») вулкана на Сахалине зимой 2005 г. *Тихоокеанская геология*, 26(4): 69–74.

10. Ершов В.В., Никитенко О.А. **2017**. Изотопный и химический состав вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана (по результатам опробования 2009 и 2010 гг.). Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки, 4–1: 110–120. https://doi.org/10.23683/0321-3005-2017-4-1-110-120

11. Жарков Р.В. **2008**. Дагинское месторождение термоминеральных вод на севере о. Сахалин. В кн.: Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: Сб. материалов II Сахалинской молодеж. науч. школы, 4–10 июня 2007, Южно-Сахалинск. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 285–290.

12. 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

13. Ильев А.Я., Сапрыгин С.М., Сирык И.М. **1970**. Извержение Пугачевского грязевого вулкана в 1967 г. Известия Сахалинского отдела Географического общества СССР, 1: 92–99.

14. Каменев П.А., Заболотин А.Е., Дегтярев В.А., Жердева О.А. **2019**. Разработка геомеханической модели активного разлома южного Сахалина. *Геосистемы переходных зон*, 3(3): 287–295. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.287-295

15. Лаврушин В.Ю., Гулиев И.С., Киквадзе О.Е., Алиев Ад.А., Покровский Б.Г., Поляк Б.Г. **2015**. Воды грязевых вулканов Азербайджана: изотопно-химические особенности и условия формирования. *Литология и полезные ископаемые*, 1: 3–29. https://doi.org/10.1134/S0024490215010034

16. Лагунова И.А., Гемп С.Д. **1978**. Гидрогеохимические особенности грязевых вулканов. *Советская геология*, 8: 108–124.

17. Мельников О.А., Ершов В.В. **2010**. Грязевой (газоводолитокластитовый) вулканизм острова Сахалин: история, результаты и перспективы исследований. *Вестник ДВО РАН*, 6: 87–93.

18. Мельников О.А., Ильев А.Я. 1989. О новых проявлениях грязевого вулканизма на Сахалине. *Тихоокеанская геология*, 3: 42–49.

19. Мельников О.А, Ершов В.В., Ким Чун Ун, Сен Рак Се. **2008**. О динамике грифонной деятельности газоводолитокластитовых («грязевых») вулканов и ее связи с естественной сейсмичностью на примере Южно-Сахалинского вулкана (о. Сахалин). *Тихоокеанская геология*, 27(5): 25–41.

20. Никитенко О.А. **2019**. Карбонатная система грязевулканических вод на примере Южно-Сахалинского грязевого вулкана. В кн.: *Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVIII Всерос. молодеж. конф., 8–14 апреля 2019, Иркутск*. Иркутск: ИЗК СО РАН, 119–120.

21. Никитенко О.А., Ершов В.В. **2017**. Глобальные закономерности формирования изотопного состава (δ^{18} O, δ D) грязевулканических вод. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 34(2), 49–60.

22. Никитенко О.А., Ершов В.В., Левин Б.В. **2017**. Первый опыт выделения гидрогеохимических индикаторов грязевулканической активности. *Доклады Академии наук*, 477(5): 586–589. https://doi.org/10.1134/S1028334X17120170

23. 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(3): 346–358. https://doi.org/10.30730/2541_8012_2018_2_4_346_358.

https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.346-358

24. Сахаров В.А., Ильин В.В., Морозова О.А., Выпряжкин Е.Н., И Кен Хи, Гоголева И.В. **2020.** Дагинское месторождение термальных минеральных вод. Условия формирования, современное состояние, перспективы использования (Сахалинская область). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 331(1): 13–26. https://doi.org/10.18799/24131830/2020/1/2443

25. Сирык И.М. **1968**. *Нефтегазоносность восточных склонов Западно-Сахалинских гор*. М.: Наука, 248 с.

26. Сорочинская А.В., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И., Зарубина Н.В., Карабцов А.А. **2008**. Геохимические и минералогические особенности грязевых вулканов о-ва Сахалин. *Вестник ДВО РАН*, 4: 58–65.

27. Цитенко Н.Д. **1961а**. Грязевые вулканы в Дагинском районе о. Сахалина. *Труды ВНИГРИ*, 181: 171–175.

28. Цитенко Н.Д. **1961b**. Воды Дагинских горячих ключей на о. Сахалине (к вопросу о формировании химического состава хлоркальциевых вод). *Труды ВНИГРИ*, 181: 203–212.

29. Челноков Г.А., Жарков Р.В., Брагин И.В., Веселов О.В., Харитонова Н.А., Шакиров Р.Б. **2015**. Геохимические характеристики подземных флюидов южной части Центрально-Сахалинского разлома. *Тихоокеанская геология*, 34(5): 81–95.

30. Чернышевская З.А. **1958**. О грязевых вулканах в южной части Сахалина. *Труды СахКНИИ СО АН СССР*, 6: 118–130.

31. Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Обжиров А.И. **2012**. Изотопно-геохимические особенности распределения метана и углекислого газа на о. Сахалин и прилегающем шельфе Охотского моря. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 2(20): 100–113.

32. Шварцев С.Л. 1996. Общая гидрогеология. М.: Недра, 423 с.

33. Шилов В.Н., Захарова М.А., Ильев А.Я., Подзоров А.В. **1961**. Извержение Южно-Сахалинского грязевого вулкана весной 1959 г. *Труды СахКНИИ СО АН СССР*, 10: 83–99.

34. Штейн М.А. **1962**. Определение параметров и глубин залегания термальных подземных вод. *Труды СахКНИИ*, 12: 162–165.

35. 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

36. Hensen C., Wallmann K., Schmidt M., Ranero C.R., Suess E. **2004**. Fluid expulsion related to mud extrusion off Costa Rica – A window to the subducting slab. *Geology*, 32(3): 201–204.

37. 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

38. Liu C.C., Jean J.S., Nath B., Lee M.K., Hor L.I., Lin K.H., Maity J.P. **2009**. Geochemical characteristics of the fluids and muds from two southern Taiwan mud volcanoes: Implications for water sediment interaction and groundwater arsenic enrichment. *Applied Geochemistry*, 24(9):1793–1802. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.06.002

39. Mazzini A., Etiope G. **2017**. Mud volcanism: An updated review. *Earth-Science Reviews*, 168: 81–112. http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.001

40. Ray S.J., Kumar A., Sudheer A.K., Deshpande R.D., Rao D.K., Patil D.J., Awasthi N., Bhutani R., Bhushan R., Dayal A.M. **2013**. Origin of gases and water in mud volcanoes of Andaman accretionary prism: implications for fluid migration in forearcs. *Chemical Geology*, 347: 102–113.

41. Sokol E.V., Kokh S.N., Kozmenko O.A., Lavrushin V.Yu., Belogub E.V., Khvorov P.V., Kikvadze O.E. **2019**. Boron in an onshore mud volcanic environment: Case study from the Kerch Peninsula, the Caucasus continental collision zone. *Chemical Geology*, 525: 58–81. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.07.018

Об авторах

НИКИТЕНКО Ольга Александровна (ORCID 0000-0002-0177-2147), научный сотрудник отдела исследования вещественного состава геосфер ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, nikitenko.olga@list.ru

ЕРШОВ Валерий Валерьевич (ORCID 0000-0003-2289-6103), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела исследования вещественного состава геосфер ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, valery_ershov@mail.ru

UDK 550.42

TRANSLATION

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.321-335.336-350

Hydrogeochemical characteristic of mud volcanism manifestations on Sakhalin Island

© 2020 Olga A. Nikitenko*, Valery V. Ershov

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: nikitenko.olga@list.ru

Abstract. There are four areas of mud volcanism traditionally set off on Sakhalin Island. Each of them is characterized by one or more eruptive mudflow seepage domains of different morphology. This article considers the results of a study of regional features of the chemical and isotopic (δ^{18} O and δ D) composition of groundwater discharging from all known mud volcanoes in the region. A pooled analysis of available literature data showed the studied waters to be heterogeneous in their geochemical parameters. This heterogeneity is most significantly manifested for the total mineralization, which average values vary from 0.1 to 22.5 g/l in the waters of different mud volcanic seepage domains. Mud volcanic waters in the region are also represented by different hydrochemical types, but HCO₂-Cl-Na waters are the most common. The isotopic characteristics testify the waters of the South Sakhalin, Pugachev, and Vostochny mud volcanoes to be formed as a result of mixing the original sea waters buried under sedimentation with meteoric and dehydration waters. One of the key factors in the metamorphization of these waters is the influx of large amounts of CO₂ into the channels of mud volcanoes, which contributes to more intensive leaching of aluminosilicate water-bearing rocks and leads to an increase in the content of Na⁺ and Mg²⁺ in mud volcanic waters. By the pooled geology and geochemical data, we made an assumption that the waters of Daginsky and Lesnovsky mud volcanic manifestations do not refer to mature groundwaters of deep circulation, thus being not generally typical for mud volcanoes. Water-formation temperatures of the South Sakhalin, Pugachev, and Vostochny mud volcanoes calculated using the Mg-Li hydrochemical geothermometer vary from 51 to 105 °C, which corresponds to depths range from 1.3 to 2.6 km. Water-formation temperatures of the Daginsky thermal and mineral springs calculated using the K–Mg geothermometer average 70 °C, which corresponds to the occurrence of an aquifer feeding this fluid system at a depth of 2.1 km.

Keywords: mud volcanoes, groundwater, chemical composition, stable isotopes, water-rock-gas interaction, Sakhalin Island

For citation: Nikitenko O.A., Ershov V.V. Hydrogeochemical characteristic of mud volcanism manifestations on Sakhalin Island. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 321–350. (Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.321-335.336-350

Introduction

Mud volcanism is one of the forms of manifestation of the endogenous processes on the Earth's surface, which provide a focused discharge of the underground fluids in the fault zones of the Earth's crust. As a rule, mud volcanoes are formed in the sedimentary basins with great thickness of the sedimentary cover and are usually combined with large oil and gas deposits. A prerequisite for the mud volcanism development is assumed to be the presence of ruptures, along which the vertical transfer of underground fluids occurs [Aliev et al., 2015]. The determination of the sources and mechanisms of mud volcanic substances generation is one of the topical and the most difficult fundamental problems when studying the processes of mud volcanism. This problem solution seems to be possible on the grounds of analysis of the regularities of the chemical and isotopic composition of liquid, solid, and gaseous products of mud volcanic activity. Geochemical studies of mud volcanoes are also associated with solving of a set of practical problems. The confinement of mud volcanoes to deep fractures of the Earth's crust makes it possible to study the relationship of fluid systems with the regional seismotectonic processes [Kamenev et al., 2019]. In addition, manifestations of mud volcanism serve as one of the search criteria for oil and gas deposits and are also considered a significant source of emission of greenhouse gases into the atmosphere [Ershov, Bondarenko, 2020].

The geography of mud volcanism covers more than 40 countries [Aliev et al., 2015]. The most extensive volcanic activity manifested in Azerbaijan and the adjacent water area of the Southern Caspian. In Russia, mud volcanoes are known on the Kerch and Taman peninsulas, as well as in the Western Kuban and the waters of the Azov and Black seas. Specified regions are often combined into the Kerch-Taman mud volcanic province, which is the second largest area of mud volcanism development in the world. Mud volcanoes in Russia are also known in the Far East, on Sakhalin Island. Our earlier comparative analysis of the substance composition of the products of the mud volcanoes activity in Azerbaijan and Sakhalin Island showed the Sakhalin volcanoes to be some distinct from Azerbaijani ones by the geochemical composition of liquid, solid, and gaseous emissions, in addition to differences in morphological characteristics and intensity of paroxysmal activity [Nikitenko et al., 2018]. Moreover, mud volcanoes on Sakhalin Island differ greatly from each other by morphology, occupied area, paroxysmal and gryphon-salse activity stages.

In general, Sakhalin Island is a unique place for the mud volcanism study: the structural and dynamic position of the island in the active transition zone from the continent to the ocean determines the presence of thick sedimentary strata with oil and gas deposits, numerous ruptures, a high degree of sediments dislocation, and intense contemporary seismotectonic activity. Hydrogeochemical studies of mud volcanic manifestations of Sakhalin Island were carried out mostly in the 60–70s of the last century. In the last decade, such works have been resumed at the Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, and a number of new results have been obtained using modern instrumental methods. This work aims to summarize and analyze the hydrogeochemical data on mud volcanoes of Sakhalin Island in order to understand the regularities of formation of isotopic and chemical composition of mud volcanic waters in the region. Besides, we believe that the geochemical specificity of mud volcanic manifestations in the region may be conditioned by the pronounced heterogeneity of the geological and tectonic conditions of their development zones. This aspect is also considered in the article.

Hydrogeological and tectonic characteristic of the studied areas

There are four traditionally identified areas of mud volcanism manifestation on Sakhalin Island: the South Sakhalin and Lesnovsky mud volcanoes in the south; the Vostochny volcano and the group of the Pugachev volcanoes (Main Pugachev, Small Northern, Small Southern) in the central part; the Daginsky mud volcanic manifestation in the north. The areas of mud volcanism manifestation on Sakhalin Island are in different geological and tectonic conditions. Herewith, all mud volcanoes are localized in sedimentary basins along large deep faults of the Earth's crust [Geology of the USSR..., 1970].

The South Sakhalin mud volcano is a volcano in the classical sense by its morphology. It is a high hill in the form of a truncated cone with a diameter of more than 400 m at the foot, composed of clay deposits. The area of fresh volcano breccia here is about 5 hectares. There are groups of gryphons and salses at the top of the hill, from which water, gas and mud are actively released. Periodically (with an interval of about 20 years), powerful volcanic eruptions occur, after which the landscape of the area significantly changes. The strongest eruptions of the South Sakhalin mud volcano were recorded in 1959, 1979, and 2001 [Mel'nikov, Ershov, 2010]. The last eruption of sufficiently high power occurred in the spring of 2020.

The Pugachev mud volcanoes have the shape of flat discs and belong to a common swampy ovate-rounded basin of 2×1.5 km. Eruptions of
varying power occur here every few years, after which new round-shaped mud fields are formed. According to the data available in the literature, 15 eruptions have been recorded on the Main Pugachev volcano since 1906: in 1906 (?), 1911, 1929, 1933, 1934, 1935, 1948 (?), 1952, 1961, 1967, 1988, 1996, 2002, 2003 and 2005 [Ershov, Mel'nikov, 2007]. Because the observations of the Pugachev mud volcano activity are irregular, it is likely that some eruptions of minor power might not have been recorded. As is obvious, the Pugachev volcano differs from the South Sakhalin one in more frequent eruptions, the power of which is quite different. The strongest eruptions on the Pugachev volcano were observed in 1934 and 2005, when area about 10 hectares was covered with emissions of fresh mud volcanic breccia. During the periods of other eruptions, the area of ejected mud volcanic breccia has rarely exceeded 1 ha. It should also be noted that the current gryphon-salse activity on the Pugachev volcano is significantly lower than on the South Sakhalin one.

The Vostochny volcano is located about 4 km north-northeast of the Pugachev volcanoes. In contrast to the South Sakhalin and Pugachev volcanoes, this is a rather small mud volcanic manifestation with much less activity. There is no reliable information about the eruptions of this volcano. There are no fields of fresh breccia here; only a few small salses located a few meters from each other are functioning.

Tectonically, the South Sakhalin and Vostochny volcanoes, and the group of Pugachev volcanoes belong to the large Central Sakhalin fault, which is the border of the junction of the West Sakhalin anticlinorium and the Central Sakhalin synclinorium. The Cretaceous rocks, unconformably bedded at the Paleozoic-Mesozoic basement, outcrop in the central part of the West Sakhalin Mountains. Eastward of the West Sakhalin Mountains, the Neogene sediments unconformably overlap the folded Cretaceous sediments [Geology of the USSR..., 1970]. Mud volcanoes are located here in the main field of the Cretaceous outcrops. Within this field, the Cretaceous stratum of the section is subdivided into the Krasnoyarkovskaya, Bykovskaya, Naibinskaya, and Aiskaya suites. Bykovskaya suite composed of homogeneous mudstones and clayey siltstones is a parent for the mud volcanoes [Mel'nikov, II'yev, 1989]. The sediments accumulation of the Bykovskaya suite took place in marine conditions. During the Cenomanian and Turonian centuries, there was a large sea basin within the West Sakhalin structure-facial zone, where a stratum of the sedimentary deposits of the Bykovskaya suite with a thickness of more than 2000 m was formed [Hydrogeology of the USSR..., 1972].

In terms of hydrogeology, these mud volcanoes are located on the border of the West Sakhalin hydrogeological massif and the Susunai hydrogeological basin. Free-flow fissure and fissure-vein waters are predominantly abundant in the West Sakhalin hydrogeological massif. Aquifers belong to the rocks of the Danish-Turonian and Cenomanian age. The water-bearing rocks of the Cenomanian aquifer are sandstones, often tuffites, less often gravelstones, siltstones. The aquifer of Danish and Turonian sediments is composed of sandstones with the beds and lenses of conglomerates, gravelstones and mudstones, the areas with coal seams are also found. By the chemical composition, the waters of the upper aquifers are hydrocarbonate (less often hydrocarbonate-chloride and chloridehydrocarbonate) with a mixed cationic composition, and fresh with mineralization of less than 0.5 g/l. Fissure-vein waters of deep circulation (revealed by the oil exploration well at a depth of about 2 km) are chloride-sodium-calcium, and their mineralization is 33 g/l [Hydrogeology of the USSR..., 1972].

In the Susunai intermountain basin adjacent to the Central Sakhalin fault in the east, the aquifers which belong to rocks of the Quaternary, Pliocene and Miocene age are developed. The waters of the Upper Quaternary aquifer are phreatic, fresh, with mineralization of less than 0.5 g/l, mostly hydrocarbonate, with a mixed cationic composition. The distribution area of associated groundwater corresponds to aquifers of the Pliocene, Upper and Middle Miocene, as well as the Lower Miocene age. The Pliocene aquifer is characterized with sodium bicarbonate

Материал доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (СС ВҮ. 4.0) waters (locally bicarbonate-chloride waters) of mixed cations composition, with mineralization of 0.2–0.3 g/l. In the underlying horizons, belonging to more ancient aquifer systems, so-dium chloride waters with increased mineralization of up to 22 g/l are developed [Hydrogeology of the USSR..., 1972].

The Lesnovsky volcano is located near the Lesnove village, at a distance of 3 km from the coast of the Sea of Okhotsk in the channel of the rightbank tributary of the Ochepuha River. This small mud volcanic manifestation is represented with several shallow (20-30 cm) slides with the diameter of about 5 m [Mel'nikov, Il'yev, 1989]. This volcano eruption was recorded only once more than 30 years ago. Currently, there is no gryphon-salse activity at this volcano. Lesnovsky mud volcano is located in the northern part of the Muravyovskaya lowland, which is lied between the Susunay and Tonino-Aniva ridges. Paleozoic and Mesozoic sediments with sharply unconformable Neogene ones, which form separate, small-area, isolated fields, are abundant in this region [Geology of the USSR ..., 1970]. Based on the geological data [Mel'nikov et al., 2008], the maximum thickness of the Neogene sediments in the area of the Lesnovsky mud volcano does not exceed 800 m. The outcropping areas of the Upper Cretaceous rocks, which outcrop from under the cover of the Neogene sediments, which are represented by Naybinskaya, Bykovskaya, and Krasnoyarkovskaya suites, are also identified in this territory. In the work [Mel'nikov, Il'yev, 1989], the same Bykovskaya suite is assumed to be a parent for the Lesnovsky mud volcano. Thin deposits of this suite are found in the outcrops of the Podorozhnaya River in the distant of 10 km southward of the place where the mud volcano was dis-Hydrocarbonate-chloride charged. sodiummagnesium/calcium waters with mineralization of about 0.1-0.2 g/l are developed in the Middle-Lower Miocene sediments [Hydrogeology of the USSR..., 1972].

Daginsky mud volcanic manifestation is very different from the other mud volcanoes on Sakhalin Island. It is a group of small gryphons and salses, the diameter of which is usually several tens of centimeters at a base. These gryphons and salses are located on the coast of the Nyisky Bay of the Sea of Okhotsk and are periodically flooded with the tide. Nearby, within a few hundred meters south-westward, there is the Daginsky thermal mineral field, which is represented on the Earth's surface with several dozens of highoutput hot springs. There is no information about any paroxysmal activity in this mud volcanic area.

The Daginsky mud volcanic area is located in the eastern part of the North Sakhalin lowland and tectonically controlled by the submeridional Hokkaido - Sakhalin fault zone. Its lower structural stage is probably composed of the Paleogene and Late Cretaceous rocks, and the upper one is composed of Neogene sediments, the thickness of which reaches 6-8 km in troughs [Geology of the USSR..., 1970]. The Neogene sediments sharply unconformably overlie the deposits of the lower structural stage and are subdivided into the Machigar, Daekhurin, Uynin, Daginsky, Okobykay and Nutov suites. All the suites, except for the middle part of the Daginsky one, are represented with marine terrigenous sandysilt sediments, while the middle part of the Daginsky suite consists of freshwater continental coal-bearing deposits. The mud volcanic area belongs to the zone of tectonic dislocation of the northeastern strike, developed in the horizons of the Nutov suite of the Pliocene age, consisting of fine-grained clayey loose sandstones. In terms of hydrogeology, the Daginsky mud volcanic manifestation corresponds to the eastern part of the North Sakhalin artesian basin, which is built of loose and weakly lithified sediments of the Quaternary, Pliocene, and Miocene ages with a total thickness of up to 2-8 km [Hydrogeology of the USSR..., 1972]. A distinctive hydrochemical zonality is observed within the basin. Fresh and brackish (up to 3 g/l) sodium bicarbonate waters are widely developed in the main area of the basin. In the eastern edge of the basin, sodium chloride waters with mineralization of 12-28 g/l prevail in the section; in some cases, less mineralized waters of chloride-hydrocarbonate-sodium composition are found, while the zone of fresh and brackish waters has a small thickness here [Hydrogeology of the USSR..., 1972].

Research materials and methods

The work summarizes and analyzes the results of the authors' own research in 2015-2017 on the isotopic and chemical composition of the waters of mud volcanoes of Sakhalin Island, as well as the previously published data. Thirteen samples for the South Sakhalin mud volcano [Ershov, Nikitenko, 2017; Lagunova, Gemp, 1978; Chernyshevskaya, 1958; Chelnokov et al., 2015; Shilov et al., 1961], six samples for Pugachev volcano [Siryk, 1968; Il'yev et al., 1970; Lagunova, Gemp, 1978], one sample for the Vostochny [Siryk, 1968] and Lesnovsky [Mel'nikov, Il'yev, 1989] volcanoes, and one for the Daginsky mud volcanic manifestation [Tsitenko, 1961a] were studied in the literature sources. A fairly small literature data concerning the geochemistry of mud volcanic waters of Sakhalin Island refer mainly to the 60-70s of the 20th century. They mostly reflect the macrocomponent composition of the waters, while the microelement and isotopic (δ^{18} O and δ D) composition for the waters of some volcanoes has not been determined at all. Chemical-analytical determinations of this period are characterized with a wide enough values scatter both for the total mineralization and for many components. Therefore, the question about the representativeness of these samples arises. For example, a very high coefficient of variation for the total mineralization of 96 % is noted for the waters of the Pugachev mud volcanoes. Our research and world experience in hydrogeochemical studies of mud volcanoes does not support such a low mineralization of mud volcanic waters. In this regard, the data of the work [Siryk, 1968] on the water samples from the Pugachev volcano with mineralization of less than 1 g/l were not taken into account in our analysis. In addition, appreciable errors were found in the quantitative chemical analysis (or misprints in the publication) for some samples, since if all the main anions and cations are present in the analysis results, these samples do not comply with the fundamental electroneutrality principle. The largest discrepancy between the sum of equivalents of anions and cations (18.5 %) was determined for one sample of the Pugachev mud volcano [Lagunova, Gemp, 1978]. However, despite the high electroneutrality discrepancy, the concentrations of the main anions and cations in this sample largely correspond to the typical composition of waters of the Pugachev volcano. Therefore, we did not exclude this sample from the general data set, but did not take it into account when analyzing and plotting graphical dependencies between the various hydrogeochemical parameters of the studied waters, as it introduces significant distortions in the trend line formation.

It is evident, that the available information on the geochemistry of mud volcanic waters of Sakhalin Island needs clarification and additional studies. In the recent decade, the authors have carried out a large number of hydrogeochemical studies of mud volcanoes. Most of them were carried out on the South Sakhalin volcano – 46 samples (field season 2015), on the group of Pugachev volcanoes – 5 samples (September 2016 and August 2017) and on the Vostochny volcano – 3 samples (August 2017).

The chemical composition analysis of the studied waters was accomplished in the Center for Collective Use of the IMGG FEB RAS. The concentrations of anions (Cl⁻, Br⁻, SO₄⁻) and cations (Li⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) were determined by the method of ion chromatography and the concentration of HCO_3^- – by the titration method. The determination of the isotopic composition ($\delta^{18}O$, δD) of mud volcanic waters was accomplished in the «Geomodel» Resource Center of St. Petersburg State University by infrared laser spectrometry.

Results and discussion

Hydrochemical studies have shown the waters of mud volcanoes of Sakhalin Island to be very heterogeneous in chemical composition (Fig. 1). This heterogeneity manifests primarily in great enough differences in total mineralization. According to the results of our sampling, the highest mineralization is typical for the waters of the South Sakhalin mud volcano, at an average of 22.5 g/l. An average mineralization index for the Vostochny volcano is 11.1 g/l, for the waters of the Pugachev mud volcanoes it is 11.2 g/l. Based on the literature

data, the mineralization of the waters of the Vostochny and South Sakhalin mud volcanoes complies with the indexes of previous years. In contrast, according to the research data of the 1960s – 1970s, the average mineralization of the waters of the Pugachev mud volcanoes is 6.2 g/l, which is almost two times less than our values (Fig. 1). Such a low mineralization index is probably conditioned by the dilution of mud volcanic waters with fresh atmospheric precipitation, since the total content of dissolved salts in the samples of the Pugachev mud volcanoes varies considerably from 2.6 to 12.5 g/l, at that period [Siryk, 1968; Il'ev et al., 1970; Lagunova, Gemp, 1978]. According to the literature data, the waters of the Daginsky (3.3 g/l) and Lesnovsky (0.1 g/l) mud volcanoes are characterized with the lowest mineralization [Tsitenko, 1961a; Mel'nikov, Il'yev, 1989].

The acid-alkali properties of the waters of the Sakhalin mud volcanoes vary within relatively small limits: the pH values are in the range from 7.0 to 9.2 for the waters of the South Sakhalin volcano, from 7.9 to 8.7 for the Pugachev volcano, and from 7.8 to 8.2 for the Vostochny one. In the ratio of the main ions, the waters of mud volcanoes of Sakhalin Island belong to the different hydrochemical types (according to the classification of S.A. Shchukarev). The waters of the South Sakhalin, Pugachev, and Vostochny mud volcanoes are hydrocarbonate-chloride-sodium, the waters of the Daginsky mud volcano have a pronounced chloride-sodium composition, the waters of the Lesnovsky volcano are hydrocarbonate-chloride-sulfate sodium-magnesium.

The observed heterogeneity of the chemical composition of the mud volcanic waters of Sakhalin Island is probably determined by the original composition of the parent mud volcanic substance. First of all, this may be conditioned by the mud volcanoes association with different aquifers, which differ in the substance composition of the water-bearing rocks, hydrochemical specificity, as well as the rate of water exchange. The chemical composition of the waters of the South Sakhalin, Pugachev and Vostochny mud volcanoes testifies to their discharge from rather large depths. The waters of the Lesnovsky mud volcano are actually ultra-fresh and correspond to the waters of the weathering zone by their hydrochemical characteristics. We believe the formation of the Lesnovsky volcano waters to occur with the active participation of the waters of the zone of free water exchange. Generally speaking, the chemical composition of the waters discharged in this area calls into question, whether the considered natural object belongs to mud volcanoes. However, the solution to this issue requires additional studies.

As for the chemical composition of the waters of the Daginsky mud volcanic manifestation, the belonging of this manifestation to the coastal part of the Nyisky Bay determines the significant influence of sea waters on the hydrogeological regime of the volcano. In the works [Tsitenko, 1961a, 1961b], it is indicated that changes in mineralization and chemical composition of waters within the Daginsky area are conditioned by different mixing degrees of low-salt waters of depth horizons, characterized by a high content of hydrocarbonate ion, with sea waters. Herewith, it is assumed that "small mud volcanoes and hot springs have the same genetic origin" [Tsitenko, 1961a, p. 174]. Indeed, mud volcanic and thermal mineral waters in the Daginsky area are similar in their chemical composition [Zharkov, 2018; Tsitenko, 1961a, 1961b] (Fig. 1). They both belong to the sodium chloride type by the ratio of the main components. Note the thermal waters to be very heterogeneous in their mineralization here, from 1.4 to 23.7 g/l [Zharkov, 2018; Tsitenko, 1961a]. Geographically, the Daginsky hydrothermal field is subdivided into three areas for the mineral waters discharge - North, Central, and South [Zharkov, 2018; Sakharov et al., 2020]. According to [Zharkov, 2018], mud gryphons are located in the Northern section, where mineralization of thermal waters is from 2.0 to 8.5 g/l, which generally complies with the usual mineralization of waters from mud gryphons. Therefore, we are also tended to believe that the waters from gryphons and thermal springs in the Daginsky area have a common genesis. Note that the chemical composition of the Daginsky thermal waters has been studied

to a greater extent. In the absence of information on any hydrochemical indexes for the waters from the Daginsky mud gryphons, we will use the data obtained for the thermal springs with appropriate reservations.

The heterogeneity of the chemical composition of the mud volcanic waters of Sakhalin Island may be also conditioned by the different gas geochemical specialization of various regions of the island. According to [Shakirov et al., 2012], there are two main gas geochemical zones on Sakhalin Island: methane and carbon dioxide-methane, which differ in tectonic structure and hydrocarbons sources. In the northeastern and eastern parts of the island, gas shows are mainly represented by methane, carbon dioxide concentration in them is very low. Therefore, for the Daginsky mud volcanic area, CH_4 is the main component of freely evolved gases. In the western and southwestern parts of the island, the carbon dioxide fraction in gas shows increases so much that it may be the predominant component. The highest CO_2 concentrations are observed on the South Sakhalin volcano – up to 95



Figure 1. Spatial differences in the chemical composition of waters of mud volcanism manifestations of Sakhalin Island, indicating the geological settings: 1 -Quaternary system, 2 -Paleogene-Neogene system, 3 -Cretaceous system, 4 -Paleozoic-Mesozoic system; 5 -main discontinuous dislocations; 6 -stratigraphic boundaries. The average values are shown for indexes of chemical composition; n -number of samples; the asterisk denotes the data resulting from our own research.

vol. %. The CO₂ concentration reaches 40 vol. % on the Pugachev and Vostochny volcanoes. Thus, we observe a tendency for increasing of the CO_2 concentration in the composition of free gases of mud volcanoes in a southern direction on Sakhalin Island. The changes in the hydrochemical type of mud volcanic waters from chloride-sodium to hydrocarbonate-chloride-sodium is noted in the same direction.

The gas saturation of groundwater determines the direction of the interaction processes in the "water-rock-gas" system, which brings to significant lithological and hydrogeochemical changes in the components of this system. The enrichment of groundwater with CO_2 is known to be the main factor, which determines the intensity of hydrolysis of waterbearing rocks. This process is accompanied not only by the formation of a secondary mineral phase, but also by the influx of mobile cations (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) from the initial minerals into the solution, as well as by the formation of HCO₃⁻ [Shvartsev, 1996].

Strong correlation between the concentrations of Na⁺ and Cl⁻ is typical for the waters of mud volcanoes of Sakhalin Island (Fig. 2). In addition, the figurative points in Figure 2 form two different linear trends, the slope of which is very distinct. On this basis, the coefficient of correlation between the Na⁺ and Cl⁻ concentrations was calculated for each group of figurative points. Thus, for the waters of the South Sakhalin, Pugachev, and Vostochny mud volcanoes, the Pearson correlation coefficient between Na⁺ and Cl⁻ is 0.95. In turn, for the thermal and mud volcanic waters of the Daginsky area, the Pearson correlation coefficient between Na + and Cl⁻ is practically equal to one. It should be noted that the point corresponding to the Lesnovsky mud volcano occupies an intermediate position between the two trends; therefore, this sample has been excluded when calculating the correlation dependences. One sample from the Pugachev mud volcano has been also excluded from the calculations due to non-observance of the electroneutrality principle.

The linear correlation between Na⁺ and Cl⁻ can be considered one of the signs that the main source of the aqueous phase of mud volcanic flu-

ids is sedimentary-buried sea waters, which subsequently were being diluted with fresh waters. Note that a positive correlation between Na⁺ and Cl- is also observed for the waters of terrestrial mud volcanoes in other regions of the world [Liu et al., 2009; Ray et al., 2013; etc.]. However, the figurative points on the Na⁺–Cl⁻ diagram corresponding to the South Sakhalin, Pugachev and Vostochny mud volcanoes are located above the line of dilution with sea water, i.e. these waters are significantly enriched in Na⁺. Consequently, the Na/Cl ratio for the waters of most of the mud volcanoes of Sakhalin Island significantly exceeds this index for seawater (which is equal to 0.55). The Na/Cl ratio averages 1.5 for the waters of the South Sakhalin volcano, 1.7 - for the Pugachev volcano, and 2.2 for the Vostochny one. Only in the waters of the Daginsky mud volcanic area, the Na/Cl ratio is quite close to sea water – about 0.7. For the Lesnovsky volcano, this ratio is equal to 1.1, but the waters of this volcano are lowmineralized ultrafresh, which primary source of recharge is probably the waters of atmospheric infiltration genesis. The formation of the chemical composition of these waters occurs as a result of weathering processes – the destruction of rocks when the atmospheric precipitation infil-



Figure 2. The ratio of CI^- and Na^+ concentrations in waters from the Sakhalin mud volcanoes (1 – South Sakhalin, 2 – Pugachev, 3 – Vostochny, 4 – Lesnovsky, 5 – Daginsky) and the Daginsky thermal springs (6). The solid line shows the hypothetic trend of seawater dilution. The dashed lines show linear regressions constructed using the least squares method (a – for the South Sakhalin, Pugachev, and Vostochny volcanoes, b – for the thermal and mud volcanic waters of the Daginsky area). One sample from the Pugachev mud volcano was excluded from the computations when constructing the trend (see explanations in the text).

trating. A number of mobile cations, including Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, income the aqueous solution during the decomposition of silicates and aluminosilicates [Driver, 1985]. The ability of waters to leach the water-bearing rocks increases due to the presence of dissolved carbon dioxide (of atmospheric and/or microbial origin) in them. A portion of the dissolved CO₂ transforms into HCO_3^- when water interacts with rocks.

The relationship between the concentrations of Na⁺ and Cl⁻ in mud volcanic waters evidences that these elements input into the mud volcanoes from the single source, as we believe, from the seawater in this case. This relation is well remained within a wide enough range of concentrations during the processes of evaporative concentration of mud volcanic waters or their dilution with meteoric waters. In these cases, the concentrations of all components of the chemical composition of waters will positively correlate not only with the content of Clions (and, thus, depend on the total mineralization) but also with each other. However, more detailed studies allow us to understand that the correlation between the concentrations of Na⁺ and Cl- for the waters of mud volcanoes may have different degree or be completely absent. So, in the course of hydrogeochemical monitoring, which we carried out on the South Sakhalin mud volcano in 2015, it was found that for mud volcanic waters, that were not diluted by atmospheric precipitation, the correlation coefficient between the contents of Na⁺ and Cl⁻ is close to zero [Nikitenko et al., 2017]. Whereas when mud volcanic waters are diluted with meteoric waters, a positive relationship is observed between Na⁺ and Cl⁻. A distinctive feature of these observations was collection of a large number of samples over the several months. Moreover, the concentrations of the major anions and cations in these samples varied in a small range, since the samples were collected at the same object. The monitoring results allow to suppose, that Na⁺ additionally input into the mud volcanic waters from some other source. Consequently, the processes of dilution or concentration can make it difficult to identify other processes involved in the formation of the chemical composition of mud volcanic waters.

The Na/Cl ratio in the waters of mud volcanoes has clear positive correlation with HCO₂/Cl, the Pearson's correlation coefficient is equal to 0.96 (Fig. 3). This dependence shows the Na/ Cl ratio to be close enough to the value of this index for seawater in the case of waters with the lowest HCO₃⁻ content. This is consistent with the hypothesis that it is the waters of marine genesis, which are the initial source for mud volcanic waters. The joint increase in the concentrations of Na⁺ and HCO₃⁻ in mud volcanic waters is a result of the metamorphization processes of the initial sedimentary seawaters. We believe that the increase in the concentration of HCO₃⁻ occurs due to the supply of inorganic carbon (first of all, the dissolution of CO_2). The saturation of mud volcanic waters with carbon dioxide increases their aggressiveness towards the waterbearing sodium-containing aluminosilicate rocks (for example, to albite – NaAlSi₂O₂), as a result of which there is an intensive leaching of Na⁺ from the water-bearing rocks and its joint accumulation with HCO_3^- in the aqueous solution.

Presumably, the concentration of Mg^{2+} in the waters of mud volcanoes of Sakhalin Island also reflects the varying degrees of metamorphization of mud volcanic waters in the region. The waters of the South Sakhalin mud volcano are enriched in Mg^{2+} in comparison with the other volcanoes: their average Mg/Cl ratio is equal



Figure 3. The correlation between Na/Cl and HCO_3/Cl ratios in waters of the Sakhalin mud volcanoes (1 - South Sakhalin, 2 - Pugachev, 3 - Vostochny, 4 - Lesnovsky, 5 - Daginsky) and Daginsky thermal springs (6). The dashed line shows the linear regression constructed using the least squares method. One sample from the Pugachevsky mud volcano was excluded from the trend calculations (see explanations in the text).

to 0.05. The Mg^{2+} concentrations in the waters of the Pugachev, Vostochny, and Daginsky mud volcanoes are comparable: the average Mg/Cl for them is about 0.02. As we believe, the observed Mg^{2+} depletion of mud volcanic waters in comparison with seawater (for which the Mg/Cl ratio is 0.07) is conditioned by the processes of transformation of mud volcanic waters resulting from interaction in the "water – rock – gas" system, in particular, the processes of carbonate minerals sedimentation and ion exchange with clays.

The concentration of Ca²⁺ in mud volcanic waters is mainly regulated by carbonate equilibrium. Thermodynamic calculations show the waters of the South Sakhalin, Pugachev and Vostochny mud volcanoes to be strongly supersaturated with respect to CaCO₃. The saturation index (SI) averages 1.5; 1.4-1.6; 1.5-1.7 respectively. We have also experimentally founded the precipitation of calcium carbonate in these waters [Nikitenko, 2019]. As a consequence, the process of CaCO₃ precipitation promotes the Ca²⁺ removal from an aqueous solution with a newly formed mineral phase. Quickly changing parameters of the carbonate system: pH and concentrations of HCO3- and CO32-, determine the intensity of the process of calcium carbonate precipitation in mud volcanic waters. In this regard, the content of Ca²⁺ in the waters of mud volcanoes of Sakhalin Island can quite strongly vary within the limits of even one volcano and does not form a clear differentiation of mud volcanic waters in the region according to this index.

The concentrations of such microcomponents as lithium and boron vary in the waters of different mud volcanoes in the region (Fig. 4). The volcanoes are well differentiated on the Cl–B–Li diagram. At that, the fields of the South Sakhalin, Pugachev and Vostochny volcanoes are located close enough to each other and are characterized with an increased content of lithium and boron in respect of sea water. Whereas the field of the Daginsky thermal mineral springs is isolated from them and located closer to the point of sea water. According to our tests results, the concentration of lithium in the waters of Sakhalin volcanoes is from 0.2 to 7.3 mg/l and boron is from 210 to

360 mg/l. The highest lithium content is observed in the waters of the South Sakhalin volcano and boron – in the waters of the Vostochny one. High boron concentrations are specific for the waters of not only Sakhalin, but also for the most mud volcanoes in the world [Mazzini, Etiope, 2017]. For example, the boron concentration can reach up to 1636 mg/l in the waters of the Kerch Peninsula volcanoes [Sokol et al., 2019]. It is believed that the enrichment of mud volcanic waters in boron occurs as a result of its desorption from clay minerals during the smectite transformation into illite [Lavrushin et al., 2015; Hensen et al., 2004; Sokol et al., 2019]. Apparently, the observed variations in the boron content in the waters of mud volcanoes of Sakhalin Island reflect the varying degrees of post-sedimentary transformations occurring in the "water-rock-gas" system.

The hydrochemical geothermometers are semiempirical dependences, which associate the concentration of some components of the chemical composition and the temperature of groundwater. They were used to estimate the thermodynamic conditions for the formation of waters of mud volcanoes of Sakhalin Island. Several geothermometers: Mg–Li, Na–Li, K–Na, and K–Mg – were used to obtain more reliable temperature estimates [Giggenbach, 1988; Kharaka, Mariner, 1989]. It should be not-



Figure 4. The ratio of Cl, Li and B concentrations (in mg/l) in waters of the Sakhalin mud volcanoes (1 – South Sakhalin, 2 – Pugachev, 3 – Vostochny), and Daginsky thermal springs (4). For comparison, concentrations of the respective components in seawater are shown (5).

ed that the values of the abyssal formation temperatures of mud volcano waters, obtained from the calculation by hydrochemical geothermometers, should be considered approximate, since their appliance does not always give unambiguous results. The performed calculations show that the forming temperatures of waters of mud volcanoes on Sakhalin Island are somewhat different (see the Table).

According to different geothermometers, reservoir temperatures for the Vostochny volcano are from 51 to 55 °C. The similar estimates for the South Sakhalin and Pugachev volcanoes are noticeably higher: within the ranges of 81-151 and 69-136 °C, respectively. The Mg-Li geothermometer, which was specially developed for the waters of sedimentary basins of the wide mineralization range, is considered the most suitable for calculating the formation temperatures of mud volcanoes [Lavrushin, 2015]. The estimates of the depth of occurrence of mud volcanic chambers were made based on the values of temperatures obtained by the Mg-Li geothermometer and the magnitude of the geothermal gradient in the studied area [Veselov et al., 1997]. Thus, the average depth of bedding of the reservoirs, from which water supply proceeds, is about 2.6 km for the South Sakhalin volcano, 2.5 km for the Pugachev volcano and 1.3 km for the Vostochny one.

According to different geothermometers, the reservoir temperatures for the waters of the Daginsky thermal mineral springs are de-

Table. Estimates of the formation temperaturesof waters of the Sakhalin mud volcanoesand Daginsky thermal springs usinghydrochemical geothermometers

Geothermometer	Temperature, °C			
	1	2	3	4
Mg-Li	105	102	51	65
Na-K	113	82	55	100
K–Mg	81	69	55	70
Na-Li	151	136	53	91

Notes. 1, 2 and 3 – the South Sakhalin, Pugachev and Vostochny mud volcanoes respectively; 4 - Daginsky thermal springs. Average values of calculated temperatures are presented for each geothermometer.

termined in the range from 65 to 100 °C (see the Table). K-Mg and Na-K geothermometers are considered the most suitable for the waters of hydrothermal systems [Giggenbach, 1988]. The abyssal formation temperatures of waters of the Daginsky thermal mineral springs, calculated using the K-Mg geothermometer, average 70 °C, and 100 °C – according to the Na-K geothermometer. When interpreting the difference in values, it should be borne in mind that the Na-K geothermometer is usually used to estimate the reservoir temperatures in excess of 150 °C [Kharaka, Mariner, 1989]. In addition, the temperatures calculated using the K-Mg geothermometer should be considered more reliable, because the equilibrium state of the K and Mg concentrations in thermal waters is reached much faster than the Na and K concentrations, resulting from which the K-Mg geothermometer responds more quickly to changes in the reservoir temperatures [Giggenbach, 1988]. In accordance with the temperatures obtained using the K-Mg geothermometer and the magnitude of the geothermal gradient in the studied area [Stein, 1962], the formation of thermal mineral waters of the Daginsky deposit occurs at a depth of 2.1 km.

Until recently, isotopic composition of the waters of mud volcanoes of Sakhalin Island has been studied very little. We have obtained isotopic determinations of δ^{18} O and δ D for the South Sakhalin, Pugachev and Vostochny mud volcanoes [Ershov, 2017, 2018]. Isotopic determinations are absent for the waters of the Lesnovsky and Daginsky mud volcanic manifestations. Assuming the common genesis of mud volcanic and thermal mineral waters in the Daginsky area and, as a consequence, the similar isotopic indexes for these waters, in this work we use the isotopic characteristics of the Daginsky thermal mineral springs from the work by R.V. Zharkov [2008].

The isotopic composition of the waters of the South Sakhalin, Pugachev and Vostochny mud volcanoes differs significantly from the composition of meteoric and sea waters (Fig. 5). The variation range of δ^{18} O values is mostly from +1.0 to +7.2 ‰ SMOW, and δ D values fluctuate in the range from -36.0 to -15.0 ‰ SMOW. It can be seen that the waters of these volcanoes differ



Figure 5. Isotopic composition of waters of the Sakhalin mud volcanoes (1 – South Sakhalin, 2 – Pugachev, 3 – Vostochnyy), Daginsky thermal springs (4) and standard seawater (SMOW – Standard Mean Ocean Water) (5).

slightly in the isotopic composition and form an almost unified field in the $\delta^{18}O-\delta D$ diagram. Note the typical values of isotopic indexes of waters of most mud volcanoes in the world to be in the intervals (-1...+7) ‰ for $\delta^{18}O$, and (-30...-10) ‰ for δD [Nikitenko, Ershov, 2017].

The contents of δ^{18} O and δ D testify to the fact that the waters of the listed mud volcanoes of Sakhalin Island are mainly formed as a result of mixing of the initial sedimentary buried sea waters with meteoric and dehydration waters. Recall that isotopically heavy dehydration waters are released during the clay minerals transformation at high temperatures and pressures.

The Daginsky thermal mineral springs differ significantly in their isotopic characteristics from the mud volcanoes of Sakhalin Island listed above. The contents of δ^{18} O and δ D in the thermal waters of the Daginsky deposit are in the ranges of (-15.3... -14.1) and (-106.8... -101.7) ‰ SMOW, respectively, which indicates the meteoric genesis of these waters. In addition, the isotopic composition of the outflowing thermal mineral waters is practically identical to the isotopic composition of groundwater in this area [Zharkov, 2008].

Significant hydrogeochemical differences between the Daginsky mud volcanic manifestation and the South Sakhalin and Pugachev mud volcanoes allow to suppose that this mud-water manifestation cannot be attributed to mud volcanoes. Earlier, the authors of [Sorochinskaya et al., 2008] have already proposed to consider the Daginsky water-mud manifestation a local hydrothermal system on the grounds that it differs from the South Sakhalin and Pugachev mud volcanoes in the isotopic and chemical composition of free gases, and elemental and mineralogical composition of the released mud mass. What is more, the source of solid emissions is probably young Neogene clays. Besides, there are no explosive eruptions typical for mud volcanoes and the fields of mound breccia formed after them.

Conclusion

According to the research results, it was found that the mud volcanic waters on Sakhalin Island are very heterogeneous in chemical composition. This heterogeneity is primarily manifested in the groundwater mineralization. The average index for different mud volcanic manifestations varies from 0.1 to 22.5 g/l. The highest mineralization is typical for the waters of the South Sakhalin volcano and the lowest - for the waters of the Daginsky and Lesnovsky mud volcanic manifestations. The waters of Sakhalin mud volcanoes also belong to different hydrochemical types. The South Sakhalin, Pugachev and Vostochny volcanoes carry hydrocarbonatechloride-sodium waters to the surface, while the waters of a chloride-sodium composition are discharged within the Daginsky mud volcanic area, and the waters of Lesnovsky volcano are characterized by a hydrocarbonate-chloridesulfate sodium-magnesium composition. Differences are also observed in the content of such microelements as lithium and boron in mud volcanic waters. The waters of the South Sakhalin, Pugachev and Vostochny mud volcanoes are abundant in these microelements. The specified hydrogeochemical heterogeneity of mud volcanic waters on Sakhalin Island is probably determined both by the initial composition of the parent mud volcanic substance and the geological and tectonic conditions of the mud volcanic regions.

By the means of the Mg–Li, Na–K, K–Mg and Na–Li hydrochemical geothermometers, estimates of the formation temperatures of mud volcanic waters of Sakhalin Island were made. According to the Mg–Li geothermometer, the South Sakhalin, Pugachev and Vostochny mud volcanoes are characterized by reservoir temperatures from 51 to 105 °C, and at an average of 70 °C for the Daginsky thermal mineral springs according to the K–Mg geothermometer. Based on regional geothermal gradients, the depth of the aquifers feeding these fluid systems is the first few kilometers.

A pooled analysis of the isotopic and chemical composition of the waters of the South Sakhalin, Pugachev, and Vostochny mud volcanoes indicates that the source of water supply for these volcanoes is deep waters of marine genesis with varying degrees of post-sedimentary changes. One of the leading factors in the metamorphization of the initial sedimentary-buried sea waters is the influx of water-soluble forms of inorganic carbon (primarily CO₂) into mud volcanoes. The saturation of mud volcanic waters with CO₂ intensifies their aggressiveness to water-containing aluminosilicate rocks, which leads to an increase of some chemical elements content in mud volcanic waters (in particular, Na⁺ and Mg²⁺).

Hydrogeochemical data testify to the fact that the waters of the Daginsky and Lesnovsky mud volcanic manifestations cannot be attributed to the mature waters of deep circulation, which interact with the host rocks for a long time at high enough temperatures and pressures. The waters of these fluid systems do not correspond to the waters of the vast majority of mud volcanoes in the world by their parameters: isotopic composition (δ^{18} O and δ D), mineralization, the content of specific microelements. At the same time, such a correspondence is observed for the waters of the Sakhalin, Pugachev, and Vostochny volcanoes. Probably, the sources of water supply of the Daginsky and Lesnovsky mud volcanic manifestation are located in the upper structural levels of the free water exchange zone.

These mud volcanic manifestations are also very peculiar in their morphology. In particular, the South Sakhalin and Pugachev volcanoes form specific mud volcanic landscapes characterized, for example, with the presence of fields of mound breccia or vegetative zoning in the direction from the eruptive center towards the periphery of the volcano. Lesnovsky volcano is not expressed in any way in the relief or landscape conditions.

Taking the ultrafresh composition of the waters of the Lesnovsky volcano into account, we believe them to be the infiltration waters, i.e., have a meteoric genesis. Therefore, we tend to think that this fluid system should not be considered a mud volcanic manifestation. The paroxysmal activity of this fluid system, recorded in 1986, is probably a local release of reservoir pressure in the upper aquifer (for example, by hydraulic fracturing). However, it must be borne in mind that by now the data on the chemical composition of the waters discharged here have been obtained for only one sample. In view of this, additional research is required for more unambiguous and reliable conclusions on this issue. Most likely, the Daginsky mud gryphons cannot be also classified as mud volcanic manifestations. The results of the pooled analysis of geological and hydrogeochemical data show significant differences between this water-mud manifestation and the South Sakhalin and Pugachev mud volcanoes. Thus, before the appearance of any new geological and geochemical data, it would be more correct to say that there are only two areas of mud volcanism manifestation on Sakhalin Island: the South Sakhalin volcano – in the south, and the Vostochny volcano and the Pugachev group of volcanoes – in the central part.

References

2. Chelnokov G.A., Zharkov R.V., Bragin I.V., Veselov O.V., Kharitonova N.A., Shakirov R.B. **2015.** Geochemical characteristics of subterranean fluids of the Southern Central Sakhalin Fault. *Tikhookeanskaya geologiya = Pacific Geology*, 34(5): 81–95. (In Russ., abstract in Eng.).

3. Chernyshevskaya Z.A. 1958. [On mud volcanoes of the southern part of Sakhalin]. Trudy

SakhKNII SO AN SSSR [Transactions of the Sakhalin Complex Scientific Research Institute SB AS of USSR], 6: 118–130. (In Russ.).

4. Driver Dzh. **1985.** *Geokhimiya prirodnykh vod*. Moscow: Mir, 440 p. Transl. from J.I. Drever. *The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments*. 1982.

^{1.} Aliev Ad.A., Guliev I.S., Dadashev F.G., Rakhmanov R.R. **2015.** *Atlas gryazevykh vulkanov mira* [*Atlas of the world mud volcanoes*]. Baku: Nafta-Press, 322 p. (In Russ.).

5. Ershov V.V. **2017.** [Peculiarities of substance composition in products of the Pugachev mud volcano activity (Sakhalin Island)]. In.: *Stroyeniye litosfery i geodinamika: Materialy XXVII Vseros. molodezhnoy konf. c uchastiyem issledovateley iz drugikh stran, 22–28 maya 2017, Irkutsk [Structure of lithosphere and geodynamics: Proceedings of the XXVII All-Russian conference for young researchers with the participation of researchers from other countries, May 22–28, 2017, Irkutsk*]. Irkutsk: Inst. of the Earth Crust SB RAS, 88–89. (In Russ.).

6. Ershov V.V. **2018.** [Isotopic and chemical composition of the waters from the Vostochny mud volcano (Sakhalin Island)]. In.: *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami: Materialy tret'yey Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiyem, 20–25 avg. 2018, Chita [Geological evolution of water-rock interaction: Proceedings of the third All-Russian scientific conference with international participation, August 20–25, 2018, Chita].* Ulan-Ude: BNTs SB RAN Publ., 284–287. (In Russ.).

7. Ershov V.V., Bondarenko D.D. **2020.** Characterization of isotopic and chemical composition of gases ejected from mud volcanoes in different regions of the world. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* [*Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geokryology*], 3: 23–35. (In Russ., abstract in Eng.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869780920030029

8. Ershov V.V., Mel'nikov O.A. **2007.** Unusual eruption of the Main Pugachevo gas-water-lithoclastic (mud) volcano in Sakhalin during the winter of 2005. *Russian J. of Pacific Geology*, 1(4): 366–370.

9. Ershov V.V., Nikitenko O.A. **2017.** Isotopic and chemical composition of waters of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano (sampling in 2009 and 2010). *Izv. vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Yestestvennye nauki* = *Izv. vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Natural Science*, 4-1: 110–120. (In Russ., abstract in Eng.). https://doi. org/10.23683/0321-3005-2017-4-1-110-120

10. [Geology of the USSR]. Vol. 32. [Sakhalin Island. Geological description]. 1970. Moscow: Nedra, 432 p. (In Russ.).

11. 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

12. Hensen C., Wallmann K., Schmidt M., Ranero C.R., Suess E. **2004.** Fluid expulsion related to mud extrusion off Costa Rica – A window to the subducting slab. *Geology*, 32(3): 201–204.

13. [Hydrogeology of the USSR]. Vol. 34. [Sakhalin Island]. 1972. Moscow: Nedra, 344 p. (In Russ.).

14. Il'yev A.Ya., Saprygin S.M., Siryk I.M. **1970.** [Eruption of the Pugachev mud volcano in 1967]. *Izvestiya Sakhalinskogo otdela Geograficheskogo obshchestva SSSR [Bulletin of the Sakhalin Department of USSR Geographical society*], 1: 92–99. (In Russ.).

15. Kamenev P.A., Zabolotin A.E., Degtyarev V.A., Zherdeva O.A. **2019.** Geomechanical model of South Sakhalin active fault. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(3): 287–295. (In Russ., abstract in Eng.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.287-295

16. 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

17. Lagunova I.A., Gemp S.D. **1978.** [Hydrogeochemical features of mud volcanoes]. *Sovetskaya geologiya* [Soviet geology], 8: 108–124. (In Russ.).

18. Lavrushin V.Y., Kikvadze O.E., Pokrovsky B.G., Polyak B.G., Guliev I.S., Aliev A.A. **2015.** Waters from mud volcanoes of Azerbaijan: Isotopic-geochemical properties and generation environments. *Lithology and Mineral Resources*, 50(1): 1–25. https://doi.org/10.1134/S0024490215010034

19. Liu C.C., Jean J.S., Nath B., Lee M.K., Hor L.I., Lin K.H., Maity J.P. **2009.** Geochemical characteristics of the fluids and muds from two southern Taiwan mud volcanoes: Implications for water sediment interaction and groundwater arsenic enrichment. *Applied Geochemistry*, 24(9):1793–1802. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.06.002

20. Mazzini A., Etiope G. **2017.** Mud volcanism: An updated review. *Earth-Science Reviews*, 168: 81–112. http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.001

21. Melnikov 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 Far East Branch of RAS*, 6: 87-93. (In Russ., abstract in Eng.).

22. Mel'nikov O.A., Il'yev A.Ya. **1989.** [New mud volcanism manifestations on Sakhalin]. *Tikhookean-skaya geologiya = Pacific Geology*, 3: 42–49. (In Russ.).

23. Mel'nikov O.A., Ershov V.V., Ung K.C., Se S.R. **2008.** Dynamics of the gryphon activity of gaswater-lithoclastite (mud) volcanoes and their relation to the natural seismicity as exemplified by the Yuzhno-Sakhalinsk volcano (Sakhalin Island). *Russian J. of Pacific Geology*, 2(5): 397–411.

24. Nikitenko O.A. **2019.** [Carbonate system of mud volcanic waters as exemplified by the South Sakhalin mud volcano]. In.: *Stroyeniye litosfery i geodinamika: Materialy XXVIII Vseros. molodezhnoy konf.*, 8–14 aprelya 2019, Irkutsk [Structure of lithosphere and geodynamics: Proceedings of the XXVII All-Russian conference for young researchers, April 8–14, 2019, Irkutsk]. Irkutsk: Institute of the Earth Crust SB RAS, 119–120. (In Russ.). 25. Nikitenko O.A., Ershov V.V. **2017.** Global patterns in formations of isotopic composition (δ^{18} O, δ D) of water from mud volcanoes. *Vestnik KRAUNTs* = *Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*, 34(2), 49–60. (In Russ., abstract in Eng.).

26. Nikitenko O.A., Ershov V.V., Levin B.W. **2017.** The first identification of hydrogeochemical indicators of mud volcanic activity. *Doklady Earth Sciences*, 477(2): 1445–1448. https://doi.org/10.1134/S1028334X17120170

27. Nikitenko O.A., Ershov V.V., Perstneva Yu.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 perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 346–358. (In Russ., abstract in Eng.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.346-358

28. Ray S.J., Kumar A., Sudheer A.K., Deshpande R.D., Rao D.K., Patil D.J., Awasthi N., Bhutani R., Bhushan R., Dayal A.M. **2013.** Origin of gases and water in mud volcanoes of Andaman accretionary prism: implications for fluid migration in forearcs. *Chemical Geology*, 347: 102–113.

29. Sakharov V.A., Ilin V.V., Morozova O.A., Vypryazhkin E.N., I Ken Khi, Gogoleva I.V. **2020.** Daginsky deposit of thermal mineral waters. Formation conditions, current state, prospects for use (Sakhalin region). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 331(1): 13–26. (In Russ.). (https://doi.org/10.18799/24131830/2020/1/2443

30. Shakirov R.B., Syrbu N.S., Obzhirov A.I. **2012.** Isotope and gas-geochemical features of methane and carbon dioxide distribution on Sakhalin Island and adjacent shelf of the Okhotsk Sea. *Vestnik KRAUNTs* = *Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*, 2(20): 100–113. (In Russ., abstract in Eng.).

31. Shilov V.N., Zakharova M.A., II'yev A.Ya., Podzorov A.V. **1961.** [Eruption of the South Sakhalin mud volcano in the spring of 1959]. *Trudy SakhKNII SO AN SSSR* [*Transactions of the Sakhalin Complex Scientific Research Institute SB AS of USSR*], 10: 83–99. (In Russ.).

32. Shteyn M.A. **1962.** [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.).

33. Shvartsev S.L. **1996.** *Obshchaya gidrogeologiya* [*General hydrogeology*]. Moscow: Nedra, 423 p. (In Russ.).

34. Siryk I.M. **1968.** *Neftegazonosnost' vostochnykh sklonov Zapadno-Sakhalinskikh gor [Hydrocarbon potential of the eastern slopes of the Western Sakhalin mountains]*. Moscow: Nauka, 248 p. (In Russ.).

35. Sokol E.V., Kokh S.N., Kozmenko O.A., Lavrushin V.Yu., Belogub E.V., Khvorov P.V., Kikvadze O.E. **2019.** Boron in an onshore mud volcanic environment: Case study from the Kerch Peninsula, the Caucasus continental collision zone. *Chemical Geology*, 525: 58–81. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.07.018

36. Sorochinskaya A.V., Shakirov R.B., Obzhirov A.I., Zarubina N.V., Karabtsov A.A. **2008.** Gasgeochemical and mineralogical features of mud volcanoes on Sakhalin Island. *Vestnik DVO RAN = Vestnik FEB RAS*, 4: 58–65. (In Russ., abstract in Eng.).

37. Tsitenko N.D. **1961a.** [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.).

38. Tsitenko N.D. **1961b.** [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.).

39. Veselov O.V., Soinov V.V. **1997.** [Heat flow in Sakhalin and Southern Kuril Islands]. In.: Geodinamika tektonosfery zony sochleneniya Tikhogo okeana s Yevraziyey. T. 4. Struktura i veshchestvennyy sostav osadochnogo chekhla severo-zapada Tikhogo okeana [Geodynamics of tectonosphere in the suture zone of the Pacific Ocean and Eurasia. Vol. 4. Structure and material composition of the sedimentary cover in the north western of the Pacific Ocean]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 153–176. (In Russ.).

40. Zharkov R.V. **2008.** [Daginsky deposit of thermal mineral 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.).

41. Zharkov R.V. **2018.** Modern physicochemical features of thermomineral waters of the Daginsky deposit (Sakhalin Island). *Monitoring. Nauka i tekhnologii = Monitoring. Science and Technologies*, 4(37): 35–40. (In Russ., abstract in Eng.). https://doi.org/10.25714/MNT.2018.37.004

About Authors

NIKITENKO Olga Alexandrovna (ORCID 0000-0002-0177-2147), research officer, 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, Yuzhno-Sakhalinsk, nikitenko.olga@list.ru

ERSHOV Valery Valerievich (ORCID 0000-0003-2289-6103), Cand. in Phys. and Math., leading researcher, 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, Yuzhno-Sakhalinsk, valery_ershov@mail.ru

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 551.422+551.435.36

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.351-358

Изменение конфигурации береговой линии о. Райкоке после эксплозивного извержения 21–25 июня 2019 г. (центральные Курильские острова)

© 2020 Ф. А. Романюк*, А. В. Дегтерев

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: f.romanyuk2011@gmail.com

Резюме. В сообщении, основанном на анализе спутниковых снимков, рассмотрены особенности изменения конфигурации береговой линии острова-вулкана Райкоке (центральные Курильские острова), вызванные сильным эксплозивным извержением 21–25 июня 2019 г. В результате аккумуляции по периферии постройки вулкана значительного количества материала пирокластических потоков и тефры, выброшенного в период активной фазы извержения, произошло резкое увеличение площади о. Райкоке на 0.53 км² (12.7 % от первоначальной площади). Сразу после окончания извержения под воздействием волновых процессов и вдольбереговых течений начался процесс разрушения новообразованных участков суши. Показано, что подобные циклические процессы являются типичными для островов-вулканов региона и определяют развитие береговой линии и облик прибрежной зоны в целом.

Ключевые слова: Курильские острова, извержение, Райкоке, вулкан, пирокластический материал, береговая зона, береговая линия

Для цитирования: Романюк Ф.А., Дегтерев А. В. Изменение конфигурации береговой линии о. Райкоке после эксплозивного извержения 21–25 июня 2019 г. (центральные Курильские острова). *Геосистемы пере*ходных зон, 2020, т. 4, № 3, с. 351–358. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.351-358

For citation: Romanyuk F.A., Degterev A.V. Transformation of the coastline of Raikoke Island after the explosive eruption on June 21–25, 2019 (Central Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 351–358. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.351-358

Transformation of the coastline of Raikoke Island after the explosive eruption on June 21–25, 2019 (Central Kuril Islands)

Fedor A. Romanyuk*, Artem V. Degterev

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: f.romanyuk2011@gmail.com

Abstract. The report based on the analysis of satellite images considers the features of the changes in the configuration of the coastline of Raikoke island volcano (Middle Kuril Islands) caused by a strong explosive eruption on June 21–25, 2019. As a result of the accumulation of a significant amount of material from pyroclastic flows and tephra along the periphery of the volcanic edifice ejected during the active phase of the eruption, the area of Raikoke Island has sharply increased by 0.53 km² (12.7 % of the original area). Immediately after the end of the eruption, under the influence of wave processes and alongshore currents, the destruction process of newly formed land areas has begun. Such cyclic processes are shown to be typical for the volcanic islands of the region and determine the coastline development and the appearance of the coastal zone as a whole.

Keywords: Kuril Islands, eruption, Raikoke, volcano, pyroclastic material, coastal zone, coastline

Благодарности и финансирование

Авторы признательны рецензентам за ценные замечания и конструктивную критику, которые будут несомненно полезны и в дальнейшей работе по этой теме.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Введение

Большая часть центрального сектора Курильской островной дуги представлена относительно небольшими по площади (до 70 км²) островами, наименьшие из которых представляют собой отдельные острова-вулканы (о. Чиринкотан, о. Райкоке, о. Янкича – 3.5– 7 км²) [Ганзей и др., 2012] (рис. 1).



Рис. 1. Схема Курильской островной дуги. На врезке – спутниковый снимок о. Райкоке (ГИС Google Earth, www.earth.google.com).

Figure 1. Scheme of the Kuril island arc. The inset shows a satellite image of Raikoke Island (from GIS Google Earth, www.earth.google.com).

Геосистемы вулканических островов чрезвычайно динамичны [Беляев и др., 2019]: практически при каждом извержении в пределах ограниченной островной суши неизбежно происходит весьма существенная трансформация береговой зоны (изменение конфигурации береговой линии и увеличение площади островов), имеющая при этом стихийный характер – она может длиться от нескольких часов/дней при мощных эксплозивных извержениях и обвалах до нескольких недель/месяцев при эффузивных извержениях. Специфика процессов определяется главным образом силой, типом и продолжительностью эруптивного события (излияние лавы, отложения пирокластики, обрушение вулканических построек). Имея данные об исторических извержениях и увязывая их с наблюдаемыми сегодня эруптивными и береговыми процессами, можно с большей достоверностью моделировать миграцию эруптивного материала более древних событий. В связи с этим изучение динамики изменений береговой линии, происходящих вследствие аккумуляции изверженного материала, и его дальнейшего перераспределения для каждого отдельного извержения представляется актуальной задачей.

В настоящем сообщении представлены данные, характеризующие динамику изменения конфигурации береговой линии при мощном эксплозивном извержении влк. Райкоке (о. Райкоке, центральные Курилы) в июне 2019 г. Основу для выводов составляют спутниковые данные (Landsat, Sentinel). Для анализа зависимости между изменениями площади острова и степенью развития берегов был рассчитан коэффициент изрезанности береговой линии острова для всех ее исследуемых конфигураций. Показатель развития береговой линии (коэффициент изрезанности) рассчитывался по формуле из [Чеботарев, 1953]: $K = L / 2\pi R$, где L - длина береговой линии, а *R* – радиус круга, площадь которого равна площади озера.

Общие сведения о вулкане Райкоке

Остров-вулкан Райкоке (абс. выс. 551 м) – самый северный вулкан в группе центральных Курильских островов. Надводная часть его постройки представляет собой одиночный стратовулкан, вершина которого образована крупным кратером (≈760 м).

По данным [Авдейко и др., 1992], на глубине ~800 м влк. Райкоке сливается с основанием подводного вулкана 3.18 – таким образом, общая высота вулканической постройки превышает 1 350 м. Северо-восточный склон вулканического конуса покрыт отложениями относительно свежей, незадернованной пирокластики. Состав пород влк. Райкоке варьирует от базальтов до андезитов, с преобладанием вулканитов основного состава [Горшков, 1967; Федорченко и др., 1989; Мартынов и др., 2015].

В 2010 г. вулканологическим отрядом Института морской геологии и геофизики ДВО РАН на влк. Райкоке проводились краткосрочные геолого-вулканологические работы и визуальные наблюдения за состоянием его активности. Было установлено, что вулкан в недавнем прошлом и в период наблюдений не проявлял каких-либо признаков активности: на склонах вулкана и в пределах кратерной зоны сформировался специфический орнитогенный ландшафт. Повсеместное распространение мест гнездования птиц, в том числе в кратере вулкана, указывало на отсутствие сольфатарной и эруптивной активности в последние годы [Левин и др., 2010].

Особенности извержения 21–25 июня 2019 г.

Мощное эксплозивное извержение влк. Райкоке началось без каких-либо предвестников: первый взрыв, зафиксированный VAAC Токио [Дегтерев, Чибисова, 2019; Рашидов и др., 2019], произошел 21 июня в 18:00 UTC (Coordinated Universal Time – всемирное координированное время, +11 к местному сахалинскому времени). Эруптивная колонна этого выброса уже через 20 мин имела высоту порядка 10 км над ур. м. После этого произошло еще пять выбросов на высоту от 10 до 13 км над ур. м. Всего в начальную фазу извержения, продолжавшуюся ~4.5 ч, произошло 6 мощных эксплозий, сформировавших пепловую тучу площадью ~19 139 км², которая распространялась преимущественно на восток. Сильный вулканический взрыв на высоту 13 км над ур. м., произошедший в 22:30 UTC, ознаменовал начало новой, более мощной фазы извержения, продолжавшейся порядка 3.5 ч [Дегтерев, Чибисова, 2019, 2020].

В течение этой фазы происходил непрерывный выброс пирокластического материала из кратера вулкана, формировались пирокластические потоки и гигантское пепловое облако. В 3:40 UTC и 5:30 UTC зафиксированы две последние сильные эксплозии с подъемом пепловой колонны до 13 км. До 09:00 UTC 22 июня вулкан проработал в режиме интенсивного выделения пепло-газовой смеси, после чего его активность постепенно начала снижаться. К 09:30–10:00 UTC пепловая туча достигла максимальной площади 227 941 км² (при длине ~1525 и ширине ~350 км). 23-25 июня наблюдалось спокойное выделение пепло-газовой смеси из центрального кратера на высоту 1.5-2 км над ур. м. 23 и 24 июня пепловый шлейф перемещался в основном в северо-западном направлении; 25 июня шлейф стало разворачивать циклоническим вихрем на северовосток [Дегтерев, Чибисова, 2019, 2020].

Трансформация береговой зоны

До мощного извержения 21-25 июня 2019 г. площадь о. Райкоке, по спутниковым данным Landsat от 26.05.2019 г., составляла 4.17 км². В результате интенсивной эксплозивной активности влк. Райкоке в период с 21 по 22 июня 2019 г. произошло накопление пирокластического материала по периферии вулканической постройки и в прибрежной зоне острова (рис. 2, 3), приведшее к изменению рисунка береговой линии и увеличению площади островной суши: по состоянию на 13.07.2019 г. площадь о. Райкоке достигала 4.7 км², увеличившись таким образом на 0.53 км² (12.7 %) (рис. 4). В последующие месяцы начался обратный процесс: под воздействием волновых процессов и вдольбереговых течений происходило разрушение новообразованных участков суши и переотложение накопленной пирокластики (рис. 3). По состоянию на 26.10.2019 г. площадь о. Райкоке составляла 4.63 км² (прирост – 0.46 км² (11.2 %)). При этом рисунок береговой линии заметно изменился: образовавшиеся непосредственно после извержения конусы выноса в южной части острова, имевшие характерную лопастную форму, были существенно сглажены, очертания берегов стали менее изрезанными (рис. 3). С приростом суши существенным образом уменьшился коэффициент изрезанности (рис. 5): до извержения он составлял около 1.43, тогда как через две недели его величина едва доходила до 1.15. В дальнейшем сокращение суши сопровождалось также снижением коэффициента (до 1.14), что связано с перераспределением пирокластического материала вдоль береговой линии.

В осенне-зимний период интенсивность сокращения площади острова несколько увеличилась, что было обусловлено сезонноклиматическими факторами: усилением циклонической активности и, соответственно, интенсификацией волнового режима. В холодную часть года (октябрь–апрель) на Северных Курилах повторяемость сильных

штормовых ветров может лохолить И до 15 дней в месяц [Атлас Курильских..., 2009]). По спутниковым данным Landsat от 05.01.2020 г., площадь о. Райкоке сократилась до 4.45 км² – таким образом, площадь новообразованной суши уменьшилась почти в два раза – до 0.29 км² (6.9 %). Значение коэффициента изрезанности к концу наблюдаемого периода составило 1.18. Имевшиеся неоднородности в очертании береговой линии были еще больше сглажены. Новообразованным материалом остались заполнены узкие бухточки на западе и востоке острова, аккумулировавшийся в них материал оказался в своеобразной ловушке. На северном и южном побережье сохранились сплошные протяженные участки пирокластических пляжей, из-за отсутствия препятствий для движения наносов материал здесь отложился более равномерно.

Наиболее значимые изменения конфигурации береговой линии произошли в весенний период. Вероятно, в связи с потеплением и сходом талых вод со склонов постройки усилился вынос пирокластического материала и перенос его омывающим остров течением с восточного побережья на юго-западное,



Рис. 2. Участки новообразованной суши о. Райкоке. Июнь 2019 г. *Фото Н.Н. Павлова* **Figure 2.** The areas of newly formed land of Raikoke Island. June, 2019. *Photo by N.N. Pavlov*

что привело к росту площади островной суши и формированию к середине апреля 2020 г. языка пляжа шириной до 120 м. При этом прирост площади по сравнению с состоянием на 26.05.2019 г. составлял уже 0.34 км² (8,2 %), а коэффициент изрезанно-

сти береговой линии уменьшился до 1.16. К концу мая ширина пляжа выросла еще на 20 м, а общая площадь новообразованной суши составила 0,37 км² (9 %) (рис. 4, 5). Степень развития берегов осталась практически неизменной.



Рис. 3. Картографические изображения изменений положения береговой линии о. Райкоке во времени. Сплошной линией показано положение береговой линии на 26.05.2019. Дата съемки указана на рисунке. **Figure 3.** Cartographic images of changes in the position of the coastline of the Raikoke Island in time. The solid line shows the position of the coastline at the time of 26.05.2019. The shooting date is shown in the picture.

На сегодняшний день это последнее состояние береговой линии, которое удалось изучить дистанционными методами: анализ данных дистанционного зондирования показал, что летом 2020 г. о. Райкоке был полностью или значительно скрыт высокой облачностью. Можно предположить, что в будущем будет происходить дальнейшее уменьшение площади островной суши до тех пор, пока система не достигнет равновесного состояния. Аналогичная картина наблюдалась и при мощном эксплозивно-эффузивном извержении влк. Пик Сарычева в июне 2009 г. [Левин и др., 2009; Левин и др., 2010]. В целом, для небольших островов и островов-вулканов это характерные рельефообразующие процессы, формирующие их современный геоморфологический облик.



Рис. 4. График изменения площади о. Райкоке после извержения 21–25 июня 2019 г. (использованы данные с 26.05.2019 по 21.05.2020 гг.).

Figure 4. The diagram of the changes in the area of Raikoke Island after the eruption on June 21–25, 2019. (data from 26.05.2019 to 21.05.2020).

Заключение

Геосистемы береговых зон, располагаясь на границе суши и моря, отличаются высокой динамичностью протекающих здесь процессов, обусловленных активным взаимодействием различных географических оболочек и высокой концентрацией вещества и энергии. На небольших вулканических островах, в том числе островах-вулканах, расположенных в регионах проявления активной вулканической деятельности, интенсивность этих процессов многократно возрастает. В частности, как было показано на примере извержения влк. Райкоке в июне 2019 г., за счет резкого поступления большого количества свежего вулканического материала происходит экстремально быстрое формирование новой суши, трансформируется прибрежный рельеф и конфигурация береговой линии. Непосредственно после окончания активной фазы извержения под воздействием прибойных волн и вдольбереговых течений начинается разрушение новообразованных участков суши, перераспределение и сортировка наносов. Этот процесс может занимать несколько месяцев или лет, иметь при этом периоды интенсификации, обусловленные сезонноклиматическими особенностями (циклоническая активность). Таким образом, подобные циклические процессы (в совокупности с геодинамической и тектонической активностью, которые сознательно не рассматриваются в контексте настоящего сообщения) и формируют в конечном итоге современный природный облик островов-вулканов:



Рис. 5. График динамик длины береговой линии (L, км), площади острова (S, км²) и развития береговой линии (K) о. Райкоке за 26.05.2019 – 21.05.2020 г.

Figure 5. The diagrams of the dynamics of the coastline length (L, km), island area (S, km^2) and the coastline development (K) of Raikoke Island for the period 26.05.2019 – 21.05.2020.

периодическое поступление вулканического материала (лавового или пирокластического) и переработка его морскими процессами.

Статистические данные, в частности отрицательная корреляция коэффициента изрезанности береговой линии со значениями площади островной суши, обнаружили типичную картину изменения морфологических показателей. В то же время меняющийся вектор динамики островной суши показал, что облика, близкого к первоначальному, конфигурация берегов о. Райкоке может достигнуть как к концу 2020 г. (при линейном течении процессов абразии без привноса дополнительных объемов материала), так и по истечении нескольких последующих лет, что при условии отсутствия активности вулкана зависит в основном от интенсивности волновых процессов и длительности штормов – в особенности в осенне-зимний период. Поскольку прогнозировать темпы эрозии береговых отложений островной суши весьма сложно, планируются дальнейшие наблюдения за трансформацией береговой зоны острова с целью изучения особенностей динамики изверженной пирокластики на границе вода-суша и особенностей формирования берегов в ходе эруптивной деятельности в целом.

Список литературы

1. Авдейко Г.П., Антонов А.Ю., Волынец О.Н. и др. **1992.** Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги. М.: Наука, 528 с.

2. Атлас Курильских островов. 2009. Москва; Владивосток: ДИК, 515 с.

3. Беляев Ю.Р., Луговой Н.Н., Бредихин А.В. **2019.** Типы берегов острова Матуа (Центральные Курильские острова). Вестник Московского университета. Серия 5, География, 3: 106–113.

4. Ганзей К.С., Иванов А.Н. **2012.** Ландшафтное разнообразие Курильских островов. *География и природные ресурсы,* 2: 87–94.

5. Горшков Г.С. 1967. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 288 с.

6. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. **2019.** Извержение вулкана Райкоке в июне 2019 г. (о. Райкоке, центральные Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 3(3): 304–309.

doi:10.30730/2541-8912.2019.3.3.304-309

7. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. **2020.** Вулканическая активность на Курильских островах в 2019 г. *Геосистемы переходных зон,* 4 (1): 93–102. doi:10.30730/2541-8912.2020.4.1.093-102

8. Левин Б.В., Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г., Василенко Н.Ф., Фролов Д.И., Майор А.Ю., Салюк П.А., Жарков Р.В., Прытков А.С., Козлов Д.Н. и др. **2009.** Комплексная экспедиция «Вулкан Сарычева – 2009» (Курильские острова). *Вестник ДВО РАН*, 6: 98–104. (In Russ.).

 Левин Б.В., Рыбин А.В., Мелекесцев И.В. 2010. Земля русская приросла после недавних событий в Сахалинской области. Вестник РАН, 80 (1): 40–44. https://doi.org/10.1134/s1019331610010053
10. Мартынов Ю.А., Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Остапенко Д.С., Мартынов А.Ю. 2015. Геохими-

ческая эволюция вулканизма о. Матуа (Центральные Курилы). Тихоокеанская геология, 34(1): 13–33.

11. Рашидов В.А., Гирина О.А., Озеров А.Ю., Павлов Н.Н. **2019.** Извержение вулкана Райкоке (Курильские острова) в июне 2019 г. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 42 (2): 5–8. doi:10.31431/1816-5524-2019-2-42-5-8

12. Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. **1989.** Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 237 с.

13. Чеботарев А.И. 1953. Гидрология суши и расчеты речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 564 с.

References

1. Avdeyko G.P., Antonov A.Yu., Volynets O.N. et al. **1992.** Podvodnyy vulkanizm i zonal'nost' Kuril'skoy ostrovnoy dugi [*Undersea volcanism and zonality of the Kuril island arc*]. Moscow: Nauka, 528 p.

2. Atlas Kuril'skikh ostrovov [Atlas of the Kuril Islands]. 2009. Moscow; Vladivostok: DIK, 515 p.

3. Belyaev Y.R., Lugovoy N.N., Bredikhin A.V. **2019.** Types of coasts of the Matua Island (Central Kuril Isles). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, 3: 106–113.

4. Ganzei K.S., Ivanov A.N. **2012.** Landscape diversity of the Kuril Islands. *Geography and Natural Resources*, 33(2): 142–148. https://doi.org/10.1134/s1875372812020072

5. Gorshkov G.S. **1967.** *Vulkanizm Kuril'skoy ostrovnoy dugi* [*Volcanism of the Kuril island arc*]. Moscow: Nauka, 288 p.

6. Degterev A.V., Chibisova M.V. **2019.** The eruption of Raikoke volcano in June of 2019 (Raikoke Island, Central Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 3(3): 304–309. (In Russ.). doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.304-309

7. Degterev A.V., Chibisova M.V. **2020.** The volcanic activity at the Kuril Islands in 2019. *Geosistemy* perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones, 4 (1): 93–102. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.093-102

8. Levin B.V., Rybin A.V., Razzhigaeva N.G., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Mayor A.Yu., Salyuk P.A., Zharkov R.V., Prytkov A.S., Kozlov D.N. et al. **2009.** [Kompleksnaya ekspeditsiya «Vulkan Sarycheva – 2009» (Kuril'skie ostrova)] ["Sarychev volcano – 2009" complex expedition (Kuril Islands]. *Vestnik DVO RAN* = *Vestnik of the FEB RAS*, 6: 98–104. (In Russ.).

9. Levin B.V., Rybin A.V., Melekestsev I.V. **2010.** Russian land expanded after recent events in Sakhalin Oblast. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 80(1): 42–46. https://doi.org/10.1134/s1019331610010053

10. Martynov Yu.A., Rybin A.V., Degterev A.V., Ostapenko D.C., Martynov A.Yu. **2015.** Geochemical evolution of volcanism of Matua Island in the Central Kurils. *Russian J. of Pacific Geology*, 9(1): 11–21. doi:10.1134/s1819714015010042

11. Rashidov V.A., Girina O.A., Ozerov A.Yu., Pavlov N.N. **2019.** The June 2019. Eruption of Raikoke Volcano (The Kurile Islands). *Vestnik KRAUNTs. Seriya Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 42 (2): 5–8. (In Russ.). doi:10.31431/1816-5524-2019-2-42-5-8

12. Fedorchenko V.I., Abdurakhmanov A.I., Rodionova R.I. **1989.** *Vulkanizm Kuril'skoy ostrovnoy dugi:* geologiya i petrogenezis [Volcanism of the Kuril island arc: geology and petrogenesis]. Moscow: Nauka, 237 p.

13. Chebotarev A.I. **1953.** *Gidrologiya sushi i raschety rechnogo stoka* [*Hydrology of land and estimations of river runoff*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 564 p.

Об авторах

РОМАНЮК Федор Александрович (ORCID: 0000-0003-1581-1503), младший научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, f.romanyuk2011@gmail.com

ДЕГТЕРЕВ Артем Владимирович (ORCID: 0000-0001-8291-2289), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, d_a88@mail.ru

УДК 627.141.1

Антропогенные сели на Сахалине

© 2020 Л. Е. Музыченко*1, Е. Н. Казакова²

¹Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия ²Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: allixev@yandex.ru

Резюме. Проблема взаимного влияния антропогенной деятельности и селевых процессов актуальна для территории о. Сахалин, где в последние десятилетия неоднократно фиксировался сход антропогенных селей. Это влияние в настоящее время усиливается вследствие расширения территории городской застройки в зонах транзита и аккумуляции селей, а также увеличения количества отвалов породы и искусственно созданных насыпей в селеопасных зонах. В работе рассматриваются случаи проявления селевой активности, связанной с деятельностью человека, характеризуются антропогенные сели и наносимый ими ущерб. На основании материалов полевых наблюдений и анализа спутниковых снимков проведена оценка изменений на территориях, пострадавших от схода антропогенных селей. Наибольший ущерб наносят сели с отвалов карьеров ввиду их больших объемов.

Ключевые слова: сели, антропогенное воздействие, селевой поток, антропогенный сель

Для цитирования: Музыченко Л.Е., Казакова Е.Н. Антропогенные сели на Сахалине. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 2, с. 359–368. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.359-368

For citation: Muzychenko L.E., Kazakova E.N. Anthropogenic debris flows in Sakhalin. Geosystems of Transition Zones, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 359–368. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.359-368

Anthropogenic debris flows in Sakhalin

Leonid E. Muzychenko^{*1}, Ekaterina N. Kazakova²

¹Sakhalin Department of Far East Geological Institute, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia ²Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia. *E-mail: allixev@yandex.ru

Abstract. The problem of the interaction between human activity and mudflow processes is currently important for the Sakhalin Island, where debris flow occurrences have been repeatedly observed in recent decades. At the present time, this interaction increases due to the extension urban territories into debris flows transit and accumulation zones, including rock spoil heaps in debris flow prone areas. This paper describes several debris flow occurrences associated with human activity in Sakhalin, as well as the characteristics of anthropogenic debris flows and consequent damage. An evaluation of changes in debris flow activity in flow prone zones was carried out based on field observations and satellite image analysis. It is suggested that the most serious damage is caused by debris flows occurrences from quarries because of the large sizes of rock spoil heaps.

Keywords: debris flow, anthropogenic impact, mudflow, anthropogenic debris flow

Введение

С расширением хозяйственной деятельности человека в сферу его влияния входит все большее число природных селевых комплексов. Искусственно создаются скопления обломочной породы, которые потенциально могут составить основную массу твердого материала будущего селевого потока – потенциальные селевые массивы (ПСМ) [Виноградов, 1980]. Такие антропогенные ПСМ образуются при разработке месторождений полезных ископаемых, прокладке трубопроводов, строительстве дорог, ЛЭП и других линейных объектов, расположенных в горных и предгорных районах.

В связи с этим сели стали возникать в местах, где ранее их сход не отмечался. А в районах распространения природных селей при вмешательстве человека увеличился масштаб селевых событий и их повторяемость [Сократов и др., 2013].

Проблема взаимного влияния антропогенной деятельности и селевых процессов актуальна для территории о. Сахалин (рис. 1), где в последние десятилетия неоднократно фиксировался сход антропогенных селей (т.е. селевых потоков, зарождение которых напрямую связано с хозяйственной деятельностью человека [Перов, 2012]), приводящий к различного рода ущербам. Сели этого генетического типа наблюдаются при кардинальном изменении человеком условий среды, для них характерны локальное рас-



Рис. 1. Антропогенные сели вблизи населенных пунктов, зафиксированные на территории о. Сахалин (отмечены серыми точками).

Figure 1. Anthropogenic debris flows near the settlements recorded on Sakhalin Island territory (marked with grey points).

пространение, повышенная повторяемость по сравнению с природными селями, а также большая регулярность проявления [Перов, 1996]. Антропогенные сели могут наносить ущерб как природным объектам (уничтожение растений, гибель животных, замутнение нерестовых рек, локальное изменение ландшафта), так и хозяйственным (разрушение и повреждение зданий, затопление сельхозугодий, завалы и смыв дорожного полотна, мостов и пр.). Отдельно следует сказать о человеческих жертвах, к которым может приводить сход антропогенных селей. Обострение этой проблемы в настоящее время обусловлено расширением территории городской застройки в зонах транзита и аккумуляции селей, а также увеличением количества отвалов породы и искусственно созданных насыпей в селеопасных зонах.

На о. Сахалин формирование антропогенных селей отмечено в районах добычи каменного угля вдоль западного побережья (Невельский, Углегорский районы), районах трасс трубопроводов (Макаровский район), ЛЭП (Анивский район), карьеров по добыче камня для строительства (Южно-Сахалинский муниципальный округ).

Объемы накопленного в отвалах материала могут достигать нескольких миллионов кубических метров. При обводнении этих отвалов в результате интенсивного снеготаяния или выпадения ливневых дождей формируются сели.

Проблема антропогенных селей не является специфической именно для о. Сахалин, сели распространены по всему миру [Ефремов, 2012; Сократов и др., 2013; Казаков, 2014; Su, Miller, 1995; Yanites et al., 2006]. Несмотря на внимание к этой проблеме на о. Сахалин [Генсиоровский и др., 2008; Генсиоровский, Казаков, 2009 a, b; Музыченко и др., 2015], она все еще остается недостаточно изученной.

В данной статье проведен комплексный обзор случаев схода антропогенных селей на острове в 2002–2019 гг., их особенностей и наносимого ими ущерба.

Основой послужил анализ информации, полученной из научных публикаций и в результате полевых наблюдений.

Наблюдения проводились сотрудниками Сахалинского филиала ДВГИ ДВО РАН в период 2006–2019 гг. Определялись характеристики селей по оставленным ими следам (измерялся пробег селей, мощность и объем отложений, высота заплеска селевой волны и т.д.) [РД 52.30.238-90].

С помощью сравнительного анализа спутниковых снимков одних и тех же территорий за 2002–2019 гг., доступных в программе Google Earth, были выполнены изображения исследуемых объектов и проведена оценка изменения площади территорий, подвергшихся воздействию антропогенных селей.

Результаты и обсуждение Факторы образования селей

Антропогенные селевые процессы распространены в разных частях о. Сахалин. Этому способствуют особенности рельефа большей части острова, представляющего из себя средневысотные горы с наивысшей отметкой 1609 м [Атлас Сахалинской области, 1967]. При этом подавляющая часть горного рельефа значительно расчленена – на глубину до 500–1000 м, а крутизна склонов достигает 35–50° [Генсиоровский, 2011].

В регионе значительно развиты отложения неогена, палеогена и верхнего мела, представленные аргиллитами, алевролитами и песчаником [Атлас Сахалинской области, 1967]. Данные породы являются слабосцементированными, и их устойчивость к размыванию и размоканию крайне низка, что приводит к интенсивному разложению этих пород, находящихся на поверхности, и достаточно быстрому накоплению ПСМ [Генсиоровский, 2011].

Для Сахалинской области в большинстве случаев пусковым механизмом селеобразования является выпадение интенсивных жидких осадков. При наложении таких осадков на пик снеготаяния вероятность схода селей увеличивается. Во время прохождения сильных осадков рыхлообломочный материал обводняется до степени перехода в текучее состояние и образует селевой поток. В зависимости от степени увлажнения ПСМ, селеобразующая сумма осадков составляет от 10-20 мм до 30-50 мм в сутки. В течение года наблюдаются два периода интенсивного увлажнения грунтов, ведущего к активизации экзогенных геологических процессов весенне-летний (май-июнь) и летне-осенний

(июль–октябрь). Первый период характеризуется сочетанием снеготаяния и выпадения осадков, второй – выходом на территорию Сахалинской области тропических циклонов и тайфунов с большим количеством осадков [Генсиоровский и др., 2008].

Освоение новых территорий увеличивает антропогенную нагрузку на них. Отвалы вскрышных пород при разработке новых месторождений и отвалы пустой породы на уже действующих формируют антропогенные ПСМ. При строительстве линейных объектов также производится перемещение масс грунта (разработка выемок, складирование грунта на бортах долин и в руслах водотоков), возникают искусственные водоемы, изза прорыва дамб которых возможно формирование селевых потоков. При этом в случае завоза материала с других территорий состав и физико-механические свойства грунтов, образующих антропогенные ПСМ, могут отличаться от характеристик пород, типичных для вмещающих их селевых бассейнов [Генсиоровский и др., 2019]. В зависимости от гранулометрического состава антропогенных ПСМ из этих массивов формируются наносоводные, грязевые и грязекаменные селевые потоки [Перов, 1996].

Вероятность образования селей повышается при нарушениях, допускаемых лесозаготовителями, когда сплошная вырубка леса производится без принятия мер по восстановлению лесных насаждений. Лесные пожары, в большинстве своем имеющие антропогенный характер, также увеличивают скорость эрозионных процессов на склонах, что вносит свой вклад в формирование ПСМ.

Любые объекты, расположенные в селевых бассейнах, влияют на динамику селевых процессов. Даже различные противоселевые сооружения не всегда уменьшают последствия схода селевых потоков, а иногда способствуют увеличению объемов и динамических характеристик, таких как скорость и расход. Подобные случаи известны в Крыму, Карпатах, Казахстане [Селеопасные районы..., 1976].

Отдельно стоит отметить роль водохранилищ и гидротехнических сооружений. Их строительство на селеносных реках может играть как положительную, так и отрицательную роль с точки зрения селевой безопасности. Водохранилище может стать селеуловителем для селевого потока небольшого объема, однако при прорыве сооружения вследствие выпадения большого количества осадков и/или интенсивного снеготаяния, а также при разрушении (повреждении) плотины во время землетрясения возможно формирование селевого потока катастрофического объема.

Таким образом, к возникновению антропогенных селевых комплексов приводят следующие виды деятельности: формирование антропогенных ПСМ – отвалов при разработке карьеров, строительстве линейных сооружений и т.п.; изменение характеристик селевых процессов при проведении работ в селевых бассейнах (строительство гидротехнических и противоселевых сооружений, распашка склонов, вырубка лесов в пределах селевых бассейнов и т.п.).

Проявления антропогенных селей на о. Сахалин

По повторяемости антропогенные сели на острове можно разделить на две условные группы: сели, которые сошли единожды, после чего не создавалось условий для их повторения, и сели, которые сходят регулярно, при этом постоянно увеличивается масштаб их воздействия на территорию.

Антропогенные сели разового проявления, как правило, вызваны ошибками проектирования или строительства объектов, а также их ненадлежащим обслуживанием, в результате чего сложились условия для формирования селевых потоков. При этом не исключена и вероятность повторного схода селей такого типа.

Одним из примеров селей разового проявления служит сход антропогенного селевого потока в районе с. Успенское (Анивский район) в 2015 г. (рис. 2). Сель сформировался в результате неграмотно выполненных работ по прокладке линии электропередач. Песчаным грунтом был пересыпан малый водоток протяженностью 300 м, вследствие чего образовался искусственный водоем. При выпадении небольшого количества осадков произошел прорыв дамбы этого водоема и образовался селевой поток. Объем вынесенного материала составил приблизительно 1500 м³. Сель прошел 180 м и выплеснулся на полотно автодороги Южно-Сахалинск – Холмск.

Другим примером селевых потоков подобного типа может служить сход селей на протяжении лесовозной дороги в Тымовском районе от населенного пункта Палево к восточному побережью Охотского моря, идущей через Чамгинский перевал. При прокладке дороги в местах пересечения ею небольших рек сооружались бревенчатые водопропускные сооружения, поверх которых насыпались грунтовые дамбы для выравнивания дорожного полотна. После того как дорога была заброшена и ее обслуживание и ремонт прекращены, водопропускные сооружения начали забиваться русловыми отложениями и карчами (целыми деревьями с корнями, подмытыми и снесенными водой). Таким образом, выше дамб формировались водоемы, и при выпадении интенсивных осадков



Рис. 2. Сель в районе с. Успенское, 2015 г. (а) – зона зарождения, (b) – селевые отложения. Фото Е.Н. Казаковой **Figure 2.** Debris flow near Uspenskoe settlement, 2015. (а) – origination zone, (b) – debris flow sediment. *Photo by E.N. Kazakova*

в летне-осенний период дамбы прорывались. Прорывная волна формировала сели из материала дамб (бревна, насыпной грунт), нанесенного мусора с включением в поток русловых отложений ниже по течению. Ввиду остановки эксплуатации дороги дамбы не восстанавливались, поэтому в дальнейшем вероятность формирования водоемов, способных вызвать сход прорывных селей, снизилась.

Ha территории населенных пунктов о. Сахалин также фиксируются случаи формирования антропогенных селевых потоков. складирование строительных Например, грунтов без водоотводных мероприятий и без учета геологического строения в г. Холмск привело к образованию в 2010 г. антропогенного селевого потока в районе комплекса зданий мореходного училища по ул. Макарова, д. 1, где с бровки площадки под разворот автотранспорта сошел оползень. Далее, в связи с большим поступлением воды (водоотвод с проезжей части улицы не обеспечен, строительными грунтами было полностью перекрыто русло малого водотока), оползень трансформировался в селевой поток (рис. 3), который прошел около 500 м и замыл водопропускное устройство на железной дороге. Объем отложений антропогенного селевого потока составил 1000 м³.

К антропогенным селям регулярного проявления относятся главным образом те селевые потоки, образованию которых способствует деятельность предприятий



Рис. 3. Зона транзита селя в г. Холмск, 2010 г. Фото Ю.В. Генсиоровского **Figure 3.** Debris flow transit zone in Kholmsk town, 2010. *Photo by Yu.V. Gensiorovsky*

по добыче полезных ископаемых, когда отвалы пород не только постоянно поддерживаются в объеме, но и увеличиваются с развитием производства.

В качестве примера можно привести сход селей на карьере Лиственничном (склон г. Медика, Сусунайский хр.), где были зафиксированы два случая образования относительно крупных для данного бассейна селей: 10 тыс. м³ и 15 тыс. м³ (2009 и 2013 гг. соответственно) [Музыченко и др., 2015], не считая регулярно сходящих селей небольших объемов. Селевыми потоками на данной территории было уничтожено около 4 га леса (рис. 4).

Анализ спутниковых снимков (программа Google Earth) показывает, что с 2009 г. протяженность зоны увеличилась с 700 до 1300 м, а площадь, покрытая отложениями, – с 0.2 до ~4 га (рис. 5 и 6).

Начиная с 2014 г. зона отложений достигла русла р. Хомутовка, при этом часть твердого материала была перемещена дальше вниз по течению реки, которая является нерестовой.

Из-за отложений в устье безымянного ручья постоянно происходят изменения его русла. Лес в этой зоне уничтожен. При сходе очередного крупного селя с карьера Лиственничный возможно подпруживание р. Хомутовка с дальнейшим прорывом дамбы и формированием селевого потока еще большего масштаба, что может угрожать расположенным ниже по течению объектам инфраструктуры планировочного района Хомутово (г. Южно-Сахалинск), пересекающим реку автодорогам и мостовым переходам через нее.



Рис. 4. Лес, уничтоженный селевыми отложениями карьера Лиственничный. Май 2019 г. Фото Л.Е. Музыченко **Figure 4.** Forest destroyed by debris flow sediment from the Listvennichniy quarry. May 2019. *Photo by L.E. Muzychenko*



Рис. 5. Увеличение дальности выброса селей и площади зоны селевых отложений в долине безымянного ручья ниже карьера Лиственничный.

Figure 5. Debris flows runout distance and accumulation zone increase in nameless river valley downstream the Listvennichniy quarry.

На других карьерах также регулярно образуются сели, что можно наблюдать по космическим снимкам (Google Earth). В районе ряда населенных пунктов, где находятся карьеры, в период с 2002 по 2017 г. фиксировался сход антропогенных селей, а площади, подвергшиеся воздействию селей, по подсчетам авторов, составили: Сокол (рис. 7) – 0.85 га, Бошняково – 3.6 га, Тельновское – 0.44 га, Краснополье – 1.2 га, Ольховка – 12.6 га. Дальнейшее расширение этих селевых бассейнов угрожает сельскохозяйственным угодьям, нерестовым рекам, объектам транспортной инфраструктуры.

Характерным примером линейных объектов, где наблюдается регулярный сход селей, является трасса нефтегазопроводов по проекту «Сахалин-2». Общая протяженность селеопасных участков трассы составляет около 20 км.

Территории, вмещающие потенциальные селевые бассейны, подверглись при строи-

тельстве значительному воздействию (была нарушена целостность дернового покрова, вырублены леса в селевых руслах и т.д.), что привело к изменению характеристик селевых бассейнов и динамики селевых процессов вдоль протяженности объекта.

Во время прокладки трассы производилось расширение узких водоразделов, выполаживание склонов, срез и перемещение больших объемов грунтов (до нескольких миллионов кубометров). На водоразделе рек Пулька и Можайка сотрудники Сахалинского филиала ДВГИ ДВО РАН зафиксировали объем таких грунтов не менее 1 млн м³. Многочисленные случаи складирования грунтов (десятки тысяч кубометров) на склонах и днищах долин таких селеносных рек, как Кринка, Кармовая, Можайка, Пулька и др., отмечались при обследовании территории в 2006–2007 гг. Наличие отвалов грунта в поймах рек и на бортах долин привело к образованию антропогенных грязевых селевых потоков в бассейнах рек Кринка и Лазовая летом 2007 г. Несколько грязевых селей объемом до 3 тыс. м³ сформировались из антропогенных грунтов и прошли по руслам ряда нерестовых рек, перекрыв их селевыми отложениями мощностью до 1.2 м на протяжении 100-300 м [Казаков, Генсиоровский, 2008].

Выходы грязекаменных селевых потоков в створ трассы нефтегазопроводов «Сахалин-2» были отмечены на участках трассы, проходящих в горной части Макаровского района в бассейнах рек Макарова, Лесная, Лазовая и у подножия хр. Жданко при прохождении глубокого циклона 22–24 июня



Рис. 6. Долина безымянного ручья ниже карьера Лиственничный (зоны транзита и аккумуляции селей выделены белым).

Figure 6. The nameless river valley downstream the Listvennichniy quarry (the transit and accumulation zones are outlined with white line).



Рис. 7. Увеличение зоны воздействия антропогенных селей с карьера на ландшафт, район пос. Сокол (зона аккумуляции выделена белым).

Figure 7. The increase of the impact zone of anthropogenic debris flows from the quarry to the landscape, the area of the Sokol settlement (the accumulation zone is outlined with white line).

2009 г. Объемы селей не были значительными (500–1500 м³) [Генсиоровский, Казаков, 2009b], однако вызвали повреждения защитных инженерных сооружений: на р. Пулька были подмыты габионы на протяжении 400 м. в верховьях р. Травяная послеселевой паводок смыл каменную наброску по оси створа трассы нефте- и газопровода. Большое количество селей было зафиксировано на подъездных дорогах к трассе нефтегазопроводов. 15 селей объемом до 1000 м³ отмечено на участке подъездной дороги длиной 5 км в районе р. Макарова. Отложения полностью блокировали подъезды к трассе [Генсиоровский, Казаков, 2009b]. Часть этих селевых потоков имела антропогенный характер, часть - природный, но при проходе природных селей через ось трассы происходил срыв антропогенного материала, что приводило к увеличению объема потоков.

В некоторых случаях переувлажнение больших масс грунтов может приводить к образованию не селей, а оползней-потоков. В поселке Горнозаводск Невельского района в мае 2018 г. произошел сход оползня-потока из материалов отвала вскрышных пород карьера по добыче угля (рис. 8).

Такое явление, как оползень-поток, занимает промежуточное положение между селем и оползнем. В случае схода оползня-потока происходит пластическое течение насыщенных водой глинистых пород, и такой поток не является турбулентным, в отличие от селевого [Полунин, 1989]. По измерениям сотрудников Сахалинского филиала ДВГИ ДВО РАН, высота фронта потока превышала 10 м, отложениями была заполнена небольшая долина шириной от 50 до 100 м и протяженностью 2000 м, мощность отложений составила 2–6 м. Были разрушены несколько жилых



Рис. 8. Отложения оползня-потока в пос. Горнозаводск, 2018 г. *Фото Е.Н. Казаковой* **Figure 8.** Mudflow sediment in Gornozavodsk settlement, 2018. *Photo by E.N. Kazakova*

домов, хозяйственные постройки, в подсобном хозяйстве погибли домашние животные. Поток остановился в 10–20 м от улицы Бамбуковой. Опасность повторения такого события сохраняется, так как на территории карьера остается достаточно твердого материала для образования оползней-потоков и селей.

Заключение

На о. Сахалин за период с 2009 по 2019 г. зарегистрирован сход более 30 антропогенных селей объемом от 1 до 20 тыс. кубометров. Потенциально условия для формирования селей существуют на отвалах большинства карьеров, на трассе нефтегазопроводов проекта «Сахалин-2» и других объектах.

Источником питания твердым материалом для селей могут служить карьеры, на которых деятельность была прекращена, но не проведена рекультивация территорий, ввиду чего там сохраняются потенциальные селевые массивы большого объема, достаточного для формирования селей весьма крупных масштабов. Сход наиболее крупных селей зафиксирован именно с отвалов карьеров. Сели меньших размеров чаще вызываются нарушениями при строительстве линейных объектов.

Количество селей и площади, подвергающиеся их воздействию, с каждым годом увеличиваются по причине постоянного роста объема антропогенных потенциальных селевых массивов, а также развития эрозионных процессов в грунтах антропогенного происхождения.

Ранее уже отмечалось, что, несмотря на широкое распространение природных и антропогенных селей на территории о. Сахалин, мероприятия по защите автомобильных и железных дорог, объектов городской инфраструктуры и др. проводятся в недостаточном объеме, ввиду их высокой стоимости и невнимания к проблеме опасности селей со стороны властей. При этом, когда защитные инженерные сооружения выполнены с ошибками, они могут быть разрушены природными селевыми потоками, а твердый материал, образующийся при их разрушении, включается в потоки, увеличивая их масштабы.

Для своевременного принятия мер по предотвращению негативных последствий хозяйственной деятельности требуется непрерывный мониторинг объектов (карьеров, линейных объектов и др.), функционирование которых потенциально увеличивает селевую опасность, а также тех, где селевая активность уже проявляется в течение ряда лет. Мониторинг состоит в регистрации проявлений антропогенной селевой деятельности с фиксацией изменения характеристик как самих потоков, так и территорий, подвергающихся их воздействию.

Список литературы

1. *Атлас Сахалинской области*. **1967.** М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете министров СССР, 135 с.

2. Виноградов Ю.Б. 1980. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеоиздат, 144 с.

3. Генсиоровский Ю.В. 2011. Экзогенные геологические процессы и их влияние на территориальное планирование городов (на примере о. Сахалин): автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Иркутск, 16 с.

4. Генсиоровский Ю.В., Казаков Н.А. **2009**а. Активизация экзогенных геологических процессов на Южном Сахалине 22–24 июня 2009 года. *Геориск*, 2: 56–60. URL: http://www.geomark.ru/journals_list/ zhurnal-georisk-22009/ (дата обращения: 02.07.2020).

5. Генсиоровский Ю.В., Казаков Н.А. **2009b**. Воздействие экзогенных геодинамических и русловых процессов на трассу нефтегазопроводов проекта «Сахалин-2» летом 2009. *Геориск*, 4: 41–45. URL: http://www.geomark.ru/journals list/zhurnal-georisk-42009/ (дата обращения: 02.07.2020).

6. Генсиоровский Ю.В., Казаков Н.А., Рыбальченко С.В. **2008**. Гидрометеорологические условия периодов массового селеобразования на о. Сахалин. В кн.: *Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Труды Междунар. конф., Пятигорск, 22–29 сент. 2008 г.* Севкавгипроводхоз, Межрегион. обществ. орг. «Селевая ассоциация». Пятигорск, 95–98. URL: http://www.fegi.ru/elibrary/articles/ glaciology/496-gensiorovsky003/file (дата обращения: 02.07.2020).

7. Генсиоровский Ю.В., Ухова Н.Н., Штельмах С.И., Гринь Н.Н., Степнова Ю.А. **2019**. Интенсификация развития экзогенных геодинамических процессов в районах размещения крупных линейных объектов, связанная с изменениями характеристик грунтов. *Геодинамика и тектонофизика*, 10(3): 697–714. https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0436 8. Ефремов Ю.Б. **2012**. Антропогенные селевые потоки в бассейне реки Мзымта. В кн.: *Труды междунар. семинара к 10-летию катастрофы на леднике Колка 20 сентября 2002 г. «Опасные природные процессы в горах: уроки Кармадонской катастрофы»*. Владикавказ: Иристон, 15–16.

9. Казаков Н.А. **2014**. Техногенные сели в Красной Поляне. В кн.: *Сб. трудов III Междунар. конф. «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита»*. Южно-Сахалинск: Сах. фил. ДВГИ ДВО РАН, 202–205. URL: http://www.fegi.ru/elibrary/conf/156-selevye-potoki-2014/file

10. Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В. **2008**. Экзогенные геодинамические и русловые процессы в низкогорье о. Сахалина как факторы риска для нефтегазопроводов «Сахалин-2». *Геоэкология. Инже*нерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 6: 483–496.

11. Казакова Е.Н., Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В. **2018.** Защита от селевых потоков на острове Сахалин. В кн.: *Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Труды 5-й Междунар. конф., Тбилиси, Грузия, 1–5 октября 2018 г.* Тбилиси: Универсал, с. 351–356.

12. Музыченко А.А., Павлов В.С., Павлов А.С. **2015**. Формирование антропогенных селевых потоков с карьеров (на примере карьера «Лиственничный»). В кн.: *Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всерос. науч. конф. с междунар. участием*: сб. материалов: в 2 т. Ред. Б.В. Левин, О.Н. Лихачева, т. 2: 346–349. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29146655

13. Перов В.Ф. **1996.** *Селевые явления*: Терминологический словарь. М.: Изд-во Московского унта, 34 с. URL: https://www.debrisflow.ru/wp-content/uploads/2015/09/Dictionary Perov.pdf

14. Перов В.Ф. 2012. Селеведение. М.: МГУ, 271 с.

15. Полунин Г.В. 1989. Динамика и прогноз экзогенных процессов. М.: Наука, 232 с.

16. РД 52.30.238-90 **1990.** *Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям.* Вып. 1. М.: Гидрометеоиздат, 199 с.

17. Селеопасные районы Советского Союза. **1976**. Под ред. С.М. Флейшмана и В.Ф. Перова. М.: Изд-во МГУ, 293 с.

18. Сократов С.А., Селиверстов Ю.Г., Шныпарков А.Л., Колтерманн К.П. **2013**. Антропогенное влияние на лавинную и селевую активность. *Лед и снег*, 53(2): 121–128.

https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-2-121-128

19. Su W.X., Miller H.D.S. **1995**. Waste pile stability and debris flow formation. In: *The 35th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 5–7 June, Reno, Nevada*. Balkema, Rotterdam, 831–835.

20. Yanites B.J., Webb R.H., Griffiths P.G., Magirl C.S. **2006**. Debris flow deposition and reworking by the Colorado River in Grand Canyon, Arizona. *Water Resources Research*, 42(W11411). https://doi.org/10.1029/2005WR004847

References

1. Atlas Sakhalinskoy oblasti [Atlas of Sakhalin Region]. **1967**. M.: Glavnoye upravleniye geodezii i kartografii pri Sovete ministrov SSSR [Chief Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR], 135 p.

2. Vinogradov Yu.B. **1980**. *Etyudy o selevykh potokakh [Mudflow studies*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 144 p.

3. Gensiorovskiy Yu.V. **2011**. Ekzogennyye geologicheskiye protsessy i ikh vliyaniye na territorial'noye planirovaniye gorodov (na primere o. Sakhalin) [Exogenous geological processes and their influence on the territorial planning of cities (on the example of Sakhalin Island)]: [extended abstract of cand. of geol. and miner. sciences diss.]. Irkutsk, 16 p.

4. Gensiorovskiy Yu.V., Kazakov N.A. **2009a**. Aktivizatsiya ekzogennykh geologicheskikh protsessov na Yuzhnom Sakhaline 22–24 iyunya 2009 goda [Activization of exogenous geological processes in South Sakhalin on June 22–24, 2009]. *Georisk* [*Geohazard*], 2: 56–60.

URL: http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-georisk-22009/ (accessed 02.07.2020).

5. Gensiorovskiy Yu.V., Kazakov N.A. **2009b**. [The impact of exogenous geodynamic and river channel processes on the pipeline route of the Sakhalin-2 project in the summer of 2009]. *Georisk* [*Geohazard*], 4: 41–45. URL: http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-georisk-42009/ (accessed 02.07.2020).

6. Gensiorovskiy Yu.V., Kazakov N.A., Rybal'chenko S.V. **2008**. [Gidrometeorological conditions of periods of mass debris flow occurrence on Sakhalin Island]. In: *Selevyye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita: Trudy Mezhdunar. konf., Pyatigorsk, 22–29 sent. 2008 g.* [Debris flow: disasters, hazard, prediction, defence: Proceedings of the Intern. Conf., Pyatigorsk, September 22–29, 2008]. Pyatigorsk: Sevkavgiprovodkhoz, Mezhregion. obshchestv. org. «Selevaya assotsiatsiya» [Sevkavgiprovodkhoz, "Debris flow association" the Interregional public organization], 95–98. URL:http://www.fegi.ru/elibrary/articles/glaciology/496-gensiorovsky003/file (accessed 02.07.2020).

7. Gensiorovskiy Yu.V., Ukhova N.N., Shtel'makh S.I., Grin' N.N., Stepnova Yu.A. **2019**. [Intensification of dynamic processes in areas with large linear objects associated with changes in the characteristics of soils]. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics and Tectonophysics*, 10(3): 697–714. https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0436

8. Efremov Yu.B. **2012**. [Antropogenic debris flows in the basin of the Mzymta river]. In: *Trudy* mezhdunar. seminara k 10-letiyu katastrofy na lednike Kolka 20 sentyabrya 2002 g. «Opasnyye prirodnyye protsessy v gorakh: uroki Karmadonskoy katastrofy» [Proceedings of International Workshop for the 10th anniversary of the catastrophe at the Kolka glacier September 20, 2002. "Natural hazards in mountains: lessons to be learned"]. Vladikavkaz: Iriston, 15–16.

9. Kazakov N.A. **2014**. Technogenic debris flow on the territory of Krasnaya Polyana. In: *III International Conf. «Debris flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection»: proceedings, Yuzhno-Sakhalinsk, September 22–26, 2014*. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin Dep. of Far East Geological Institute of FEB RAS, 202–205. URL: http://www.fegi.ru/elibrary/conf/156-selevye-potoki-2014/file (In Russ.).

10. Kazakov N.A., Gensiorovskiy Yu.V. **2008**. Ekzogennyye geodinamicheskiye i ruslovyye protsessy v nizkogor'ye o. Sakhalina kak faktory riska dlya neftegazoprovodov «Sakhalin-2» [Exogenous geodynamic and river channel processes in the low-mountains area of Sakhalin Island as risk factors for the "Sakhalin-2" oil and gas pipelines]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* [Geoecology, Engineering geology, Hydrogeology, Geocryology], 6: 483–496.

11. Kazakova E.N., Kazakov N.A., Gensiorovskiy Yu.V. **2018**. Debris flow protection on Sakhalin Island. In: *Debris flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection: Proceedings of the 5th International Conf. Tbilisi, Georgia, 1–5 October 2018*. Tbilisi: Universal, p. 351–356.

12. Muzychenko A.A., Pavlov V.S., Pavlov A.S. **2015**. [Formation of antropogenic debris flows from the quarries (by the example of the "Listvennichnyy" quarry)]. In: *Geodinamicheskiye protsessy i prirodnyye katastrofy. Opyt Neftegorska: Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiyem*: sb. materialov [*Geodynamic processes and natural disasters. Experience of Neftegorsk: All-Russian Scientific Conf. with international participation*: collection of proceedings]: in 2 vol. Ed. B.W. Levin, O.N. Likhacheva, vol. 2: 346–349. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29146655

13. Perov V.F. **1996**. [*Mudflow phenomena*: Terminological dictionary]. M.: Izd-vo Moskovskogo un-ta [Publ. House of Moscow State University], 34 p.

URL: https://www.debrisflow.ru/wp-content/uploads/2015/09/Dictionary_Perov.pdf

14. Perov V.F. 2012. Selevedeniye [Mudflow studies]. M.: MGU [MSU], 271 p.

15. Polunin G.V. **1989**. *Dinamika i prognoz ekzogennykh protsessov* [Dynamics and forecast of exogenous processes]. M.: Nauka, 232 p.

16. RD 52.30.238-90 1990. Rukovodstvo selestokovym stantsiyam i gidrograficheskim partiyam [Guidelines for mudflow runoff stations and hydrographic parties]. Iss. 1. M.: Gidrometeoizdat, 199 p.

17. Seleopasnyye rayony Sovetskogo Soyuza [Mudflow vulnerable areas of the Soviet Union]. 1976. Eds. S.M. Fleyshman, V.F. Perov. M.: Izd-vo MGU [MSU], 293 p.

18. Sokratov S.A., Seliverstov Y.G., Shnyparkov A.L., Koltermann K.P. **2013**. Anthropogenic effect on avalanche and debris flow activity. *Ice and Snow*, 53(2): 121–128. (In Russ.). https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-2-121-128

19. Su W.X., Miller H.D.S. **1995**. Waste pile stability and debris flow formation. *The 35th U.S. Symposium* on Rock Mechanics (USRMS), 5–7 June, Reno, Nevada. Balkema, Rotterdam, 831–835.

20. Yanites B.J., Webb R.H., Griffiths P.G., Magirl C.S. **2006**. Debris flow deposition and reworking by the Colorado River in Grand Canyon, Arizona. *Water Resources Research*, 42(W11411). https://doi.org/10.1029/2005WR004847

Об авторах

МУЗЫЧЕНКО Леонид Евгеньевич, ведущий инженер, лаборатория лавинных и селевых процессов, Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института ДВО РАН (СФ ДВГИ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, allixev@yandex.ru

КАЗАКОВА Екатерина Николаевна (ORCID 0000-0002-5774-4030), кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории экзогенных геодинамических процессов и снежного покрова, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН (СКБ САМИ ДВО РАН), старший научный сотрудник, научно-исследовательский центр «Геодинамика», Южно-Сахалинск, kazakova-e-n@ya.ru

Подписка на журнал «Геосистемы переходных зон» на 2020 год принимается всеми отделениями «Роспечати» Индекс 80882.

Полнотекстовые варианты статей доступны на сайтах: журнала http://journal.imgg.ru; научной электронной библиотеки (eLibrary) https://elibrary.ru/title_about.asp?id=64191

