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

ГЕРЕХОДНЫХ ЗОН



Геосистемы переходных зон

Сентябрь – Декабрь

Tom 4 № 4 2020

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

GEOSYSTEMS OF TRANSITION ZONES

Vol. 4 No 4 2020

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, геозкологии 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 (географические)
- 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)

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

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 September – December

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 and Doctor of Sciences degrees should be published. Scientific specialities of dissertations and their respective branches of science are the following:

- 25.00.01. General and regional geology (Geology and Mineralogy)
- 25.00.03. Geotectonics and Geodynamics (Geology and Mineralogy)
- 25.00.04. 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)

Content is available under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

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

Редакционная коллегия

Editorial Board

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

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 № 4 2020 Сентябрь – Декабрь

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

http://journal.imgg.ru

Content

GEOSYSTEMS OF TRANSITION ZONES Vol. 4 No 4 2020 September – December

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

Содержание

Геотектоника и геодинамика

Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

В.К. Лексин. Применение сейсморазведки высокого разрешения для поисков локальных газовых аномалий на Южно-Киринском нефтегазоконденсатном месторождении384

Геофизика. Сейсмология

Петрология, вулканология

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

Геоморфология и эволюционная география

Геоэкология

От редакции

Geotectonics and geodynamics

Geophysics, geophysical methods of mineral exploration

Geophysics, Seismology

Petrology and volcanology

SHORT REPORT

Geomorphology and evolutionary geography

Geoecology

Editorial Note

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.).

Редактор к.ф.н. Низяева Галина Филипповна Editor Galina Ph. Nizyaeva, Cand. Sci. in Phylology Дизайн Леоненкова Александра Викторовна Design Alexandra V. Leonenkova Компьютерная верстка Филимонкина Анна Александровна Desktop publishing Anna A. Filimonkina Корректор Качесова Галина Сергеевна Proofreader Galina S. Kachesova Типография: 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б. Publisher: 1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022. http://www.imgg.ru http://www.imgg.ru Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 19,8. Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 19,8. Тираж 150 экз. Заказ 7941. Свободная цена. Number of copies 150. Order no. 7941. Free price. Подписано в печать 30.12.2020. Date of publishing 30.12.2020. Subscription index in catalogue of the "Rospechat" agency - 80882 Подписной индекс в каталоге агентства «Роспечать» - 80882 По вопросам распространения обращаться также The Editorial Office can also be contacted by: E-mail: gtrz-journal@mail.ru E-mail: gtrz-journal@mail.ru

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

371

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.248.2+550.341

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.372-383

Новые данные о новейшем напряженном состоянии земной коры острова Сахалин (по структурно-геоморфологическим индикаторам тектонических напряжений)

© 2020 Л. А. Сим¹, П. А. Каменев^{*2}, Л. М. Богомолов²

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия ²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: p.kamenev@imgg.ru

Резюме. Для верификации представлений о неотектонических и современных напряжениях Сахалина анализируются структурно-геоморфологические признаки напряженного состояния этого региона, обнаруженные в ходе полевых работ 2019–2020 гг. Наряду с новыми полевыми замерами структурно-геоморфологическим методом представлены данные о деформации земной коры на основе GPS/ ГЛОНАСС-измерений. Приводятся данные геофизических исследований (сейсмологических и скважинных методов). Подтверждено выделение трех типов областей с различной геодинамической обстановкой растяжения, сжатия и чистого сдвига. Отмечены вариации современного поля напряжений на границах областей с различной геодинамической обстановкой формирования новейших разломов. Северный Сахалин имеет специфические направления осей сжатия неотектонических напряжений, выраженные в северо-восточных ориентировках, в отличие от преобладающих субширотных ориентировок на всем острове. Проведенные исследования показали, что на юге Сахалина граница между Амурской и Охотской микроплитами проходит, скорее, по Западно-Сахалинскому, а не по Центрально-Сахалинскому разлому.

Ключевые слова: Сахалин, зона разлома, неотектоника, неотектонические и современные напряжения, борозды скольжения, будинаж, механизмы очагов землетрясений, геодинамический режим, граница Амурской и Охотской микроплит

New data on the latest stress state of the earth's crust on Sakhalin Island (based on structural and geomorphological indicators of tectonic stress)

Lidia A. Sim¹, Pavel A. Kamenev^{*2}, Leonid M. Bogomolov²

¹Schmidt Institute of Earth Physics, RAS, Moscow, Russia ²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: p.kamenev@imgg.ru

Abstract. To verify the ideas about neotectonic and modern stresses of Sakhalin, we analyze structural and geomorphological signs of the stress state of this region, discovered during field work in 2019–2020. Along with updated field measurements using the structural-geomorphological method, data on crustal deformation based on GPS/GLONASS measurements are presented. Data from geophysical studies (seismological and borehole methods) are given. The identification of three types of areas with different geodynamic regime: transtension, transpression and strike – slip (simple shift) is confirmed. Variations of the current stress field at the boundaries of regions with different geodynamic regime for the formation of new faults are noted. Northern Sakhalin has specific directions of compression axes of neotectonic stresses, expressed in North-Eastern orientations, in contrast to the prevailing sublatitudinal orientations on the entire island. Studies have shown that in the south of Sakhalin, the border between the Amur and Okhotsk microplates runs along the West Sakhalin fault rather than the Central Sakhalin fault.

Keywords: the Sakhalin, fault zone, neotectonics, neotectonic and modern stresses, slickenlines, boudinage, focal mechanisms of earthquakes, geodynamic regime, Amur and Okhotsk microplates border

Для цитирования: Сим Л.А., Каменев П.А., Богомолов Л.М. Новые данные о новейшем напряженном состоянии земной коры острова Сахалин (по структурно-геоморфологическим индикаторам тектонических напряжений). Геосистемы переходных зон. 2020, т. 4, № 4, с. 372–383. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.372-383

For citation: Sim L.A., Kamenev P.A., Bogomolov L.M. New data on the latest stress state of the earth's crust on Sakhalin Island (based on structural and geomorphological indicators of tectonic stress). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones.* 2020, vol. 4, no. 4, pp. 372–383. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.372-383

Благодарности

Авторы благодарны А.О. Горбунову и В.А. Дегтяреву за помощь в проведении полевых работ, О.А. Жердевой за работу с графическим материалом. Отдельная благодарность А.В. Уба за проведение фотосъемки с БПЛА.

Acknowledgements

Authors are grateful to A.O. Gorbunov and V.A. Degterev for help in field works carrying out, O.A. Jerdeva for work with graphicmaterial. Special thanks to A.V. Uba for taking photo with the drone.

Введение

Целью исследований является верификация полученных ранее результатов, т.е. повторная реконструкция неотектонических напряжений с помощью комплекса методов, и сравнение с имеющимися сейсмологическими и геофизическими данными для более полной характеристики напряженного состояния Сахалина. Это предполагает демонстрацию эффективных, но недостаточно используемых структурно-тектонофизических методов для изучения тектоники отдельных регионов и разработки модели напряженного состояния о. Сахалин. Данными методами охарактеризовано постмиоценовое напряженное состояние острова. Вместе с тем мы покажем, принимая во внимание данные о сеймичности и GPS/ ГЛОНАСС-измерения, что современное поле тектонических напряжений в земной коре Сахалина в основном унаследовано от распределения напряжений в постмиоценовое время.

Новейшее напряженное состояние острова и кинематические типы отдельных разломов исследовались различными тектонофизическими и структурными методами. Так, на северном и центральном Сахалине в районах развития почти сплошного чехла плиоценчетвертичных отложений неотектонические напряжения восстанавливались структурногеоморфологическим (СГ) методом реконструкции сдвиговых напряжений [Сим, 1991; Ребецкий и др., 2017], а на южном Сахалине – полевыми структурными и тектонофизическими методами, которые включали метод анализа сколовых сопряженных пар трещин [по Гзовскому, 1975], метод кинематического анализа трещинных структур разрушения [по Гущенко, 1979], метод поясов при исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями [по Даниловичу, 1961]. Кроме того, в 2019–2020 гг. авторами была уточнена схема неотектонических напряжений п-ова Шмидта – ориентировки оси сжатия в СВ направлении. С использованием БПЛА (беспилотного летательного аппарата) проведена съемка на морской террасе (осушенном бенче в южной части г. Невельск). Для проверки устойчивости ранее проведенной реконструкции локальных тектонических напряжений были выполнены дополнительные полевые измерения в 3 пунктах на территории южного Сахалина.

Для южного Сахалина восстановленные ориентации осей локальных стресс-состояний (ЛСС) дали возможность реконструировать единое региональное поле этой части острова по методике, изложенной в [Сим, 1982; Ребецкий и др., 2017].

Тектонофизические методы реконструкции напряжений: новые результаты

По топографическим картам масштаба 1:1 000 000 и космическим фотоснимкам структурно-геоморфологическим методом восстановлены тектонические напряжения северного и центрального Сахалина (рис. 1 А, С). Реконструкция тектонических напряжений заключается в дешифрировании линеаментов, возможных разломов и специальном дешифрировании мелких прямолинейных элементов рельефа, именуемых нами мегатрещинами. Если взаимные относительные ориентировки мегатрещин – две системы сколов и отрывы, ориентированные по биссектрисе между ними, соответствуют ориентации оперяющих трещин в зоне сдвига (при этом они имеют



Рис. 1. Схемы новейшей геодинамики и сейсмичности (по материалам [Сим и др., 2016, 2017а]).

А – неотектонические структуры и оси главных нормальных напряжений. 1–3 – неотектонические структуры:
1 – разломы, выделенные по геоморфологическим данным, 2 – границы структур 1-го порядка, 3 – границы поднятий и впадин. Римскими цифрами обозначены поднятия: I – Шмидтовское, II – Западно-Сахалинское, III – Восточно-Сахалинское, V – Сусунайское; впадины: IV – Центрально-Сахалинская. Прочие обозначения:
4 – оси сжатия в горизонтальной плоскости на северном и центральном Сахалине, восстановленные СГ методом, сопровождаемые: 4а – трехосным напряженным состоянием, 4b – обстановкой дополнительного растяжения, 4c – обстановкой дополнительного сжатия; 5 – оси напряжений на южном Сахалине, восстановленные по банку данных о локальных стресс-состояниях (ЛСС): а – алгебраически минимальные, b – максимальные. Крупнейшие разломы (цифры в кружках): 1 – Центрально-Сахалинский, 2 – Хоккайдо-Сахалинский, 3 – Верхнепильтунский, 4 – Набильский.

В – линеаментно-доменная модель распределения сейсмичности Сахалина.

С – схема районирования областей с разной геодинамической обстановкой. 6–8 – оси сжатия, восстановленные СГ методом в разных геодинамических обстановках: 6 – дополнительного растяжения, 7 – трехосного напряженного состояния, 8 – дополнительного сжатия; 9 – сдвиги; 10 – оси главных нормальных напряжений, восстановленные методом нахождения общих полей напряжений по данным о ЛСС: 10а – растяжения, 10b – сжатия; 11 – траектории субгоризонтальных осей сжатия; 12 – границы областей с разной геодинамической обстановкой; 13 – области с обстановкой дополнительного растяжения*: А1 – Северная, А2 – Поясок; 14 – области с трехосным напряженным состоянием*: В1 – Западная, В2 – Южно-Сахалинская; 15 – области с обстановкой дополнительного сахалинская.

Figure 1. Schemes of the latest geodynamics and seismicity (by materials of [Sim et al., 2016, 2017a]).

A - neotectonic structures and axes of principal normal stresses. 1-3 - neotectonic structures: 1 - faults identified according

^{*}В работе [Сим и др., 2017а] в подписи к рис. 7, на котором была впервые приведена схема режимов новейшей геодинамики Сахалина, допущена опечатка в обозначении обстановки цветом: области A1 и A2 с обстановкой дополнительного растяжения должны быть обозначены голубым цветом, а области B1 и B2 с трехосным напряженным состоянием – серым (см. рис. 1 С в настоящей статье).

определенную ориентацию к плоскости разлома), то доказывается разломная природа линеамента. Далее определяются ориентации осей сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости, знак сдвига (правый/левый) и геодинамическая обстановка формирования разлома (растяжения - сжатия). Нижний возрастной рубеж активности разлома определяется по возрасту молодых плиоцен-четвертичных отложений, которые развиты практически по всей исследуемой территории и разбиты мегатрещинами и новейшими разломами. Определения сдвиговых неотектонических напряжений по разломам, выделенным на структурно-геоморфологической карте, подтверждают справедливость проведения дизъюнктивов на основе анализа рельефа, а разная высота в противоположных крыльях разлома позволяет оценить вертикальную компоненту перемещений.

Стоит отметить, что одна из горизонтальных осей может быть промежуточной осью главных нормальных напряжений. Сдвиговые кинематические типы разломов напряжения согласуются с определениями кинематики разрывных нарушений, откартированных на северном Сахалине [Рождественский, 1982; Рождественский, 2008], а также с сейсмодислокациями, образовавшимися при Нефтегорском землетрясении 1995 г., Mw = 7.0 [Рогожин и др., 2002]. Восстановленные тектонические напряжения свидетельствуют о преимущественно субмеридиональном растяжении и субширотном сжатии на значительной части острова; при продвижении на север ориентировка оси сжатия изменяется на северо-восточную (рис. 1 А, С). Разворот осей сжатия на северном Сахалине на северо-восток согласуется со схемой эллипсоида допозднемиоценовых деформаций всего Сахалина, приведенных в работе [Рождественский, 2008]. В этой же работе, по мнению ее автора, эллипсоид деформаций в плиоцен-четвертичное время развернулся, ось С, или ось укорочения, стала широтной, что привело к изменению кинематического типа сдвигов по продольным меридиональным разломам Сахалина на взбросонадвиговый. Так как детальные исследования разновозрастных складчатых и разрывных структур В.С. Рождественского [Рождественский, 1982; Рождественский, 2008] относятся преимущественно к северному и центральному Сахалину, то можно допустить, что на южный Сахалин это изменение типа напряженного состояния не распространяется. Тем более что автор отмечает: «...правомерность применения эллипсоида напряжений неоднократно ставилась под сомнение...», но использование его имеет прикладное значение, «хотя наблюдаются аномальные структуры, трудно объяснимые с точки зрения этой теории» [Рождественский, 1997, с. 96].

В северной части Сахалина реконструкция неотектонических напряжений СГ методом на п-ове Шмидта позволила уточнить неотектоническое напряженное состояние полуострова. Западное побережье и самый север полуострова характеризуются сдвиговым полем

to the geomorphological data, 2 - boundaries of the first-order structures, <math>3 - boundaries of uplifts and depressions. Uplifts: I - Schmidt, II - Western Sakhalin, III - Eastern Sakhalin, V - Susunai; Depressions: IV - Central Sakhalin depression. Other designations: 4 - compression axes in the horizontal plane in Northern and Central Sakhalin (reconstruction by the method of structural geology), which is accompanied by: a - triaxial stress state, b - additional extension, c - additional compression; 5 - stress axes in Southern Sakhalin which were reconstructed using the database on the local stress state (LSS): (a) - algebraically minimal stresses, and (b) - maximal ones. Major faults (numbers in circles): 1 - Central Sakhalin, 2 - Hokkaido-Sakhalin, 3 - Verhnepiltunsky, 4 - Nabilsky.

B – The lineament domain model of seismicity distribution over Sakhalin area.

C – zoning scheme for regions with different geodynamic regime. 6-8 – compression axes reconstructed by the method of structural geology in different geodynamic conditions: 6 – additional extension, 7 – triaxial stress state, 8 – additional compression; 9 – strike-slip faults; 10 – axes of the principal normal stresses, reconstructed using the method of the total stress fields detection according to the data on LSS: 10a – extension, 10b – compression; 11 – trajectories of subhorizontal compression axes; 12 – boundaries of areas with different geodynamic conditions; 13 – areas with additional extension*: A1 – Northern, A2 – Poyasok; 14 – areas with triaxial stress state*: B1 – Western, B2 – Yuzhno–Sakhalinsk; 15 – areas with additional compression: C – Central-Sakhalin.

^{*}In [Sim et al., 2017a], in the caption to Figure 7, where the diagram of the latest geodynamic regimes of Sakhalin was first presented, there was a misprint in the designation of the conditions with color: the A1 and A2 areas with conditions of additional tension should be highlighted in blue, and the B1 and B2 areas with a triaxial stress state should be gray (see Fig. 1C in present article).

напряжений с субмеридиональной ориентацией оси сжатия, а на восточной части восстановлены ориентации оси сжатия северо-восточного простирания. На Охинском перешейке восстановлены субширотные ориентации оси сжатия, характерные для всей остальной части Сахалина.

Интерпретация полученных данных следующая. При субширотном сжатии, унаследованном от сахалинской фазы складчатости, и меридиональном растяжении образовались перешейки Поясок и Охинский (рис. 1 А, С). Резкое изменение ориентировки оси сжатия на меридиональное на западе и севере п-ова Шмидта произошло предположительно в четвертичное время. Следствием этого явилось образование Амурского лимана и отчленение пра-русла Амура, дельтовые отложения которого картируются на п-ове Шмидта. Изменение поля напряжения затронуло и север п-ова Шмидта, на котором также определены меридиональные ориентации оси сжатия и субширотные – оси растяжения. Предположительно это связано с развитием впадины Дерюгина в плиоцен-четвертичное время, вызвавшим субширотное растяжение.

Комплексом полевых методов на южном Сахалине и южной части центрального Сахалина ранее был определен набор 56 локальных стресс-состояний (ЛСС) и представлены их стереограммы [Сим и др., 2017а]. Сопоставление стереограмм (результата реконструкции локального поля тектонических напряжений) с упрощенной схемой геологического строения по [Голозубов и др., 2012] выявило значительный разброс осей главных нормальных напряжений локального уровня. Единое региональное поле напряжений этой части острова было восстановлено по методике, обоснованной в работах [Сим, 1991; Ребецкий и др., 2017]. Общее поле имеет следующие характеристики: ось растяжения $\sigma_1 - 350 \angle 10$, промежуточная ось σ₂ − 112∠66, ось сжатия σ₂ – 260∠20. В этом поле напряжений максимально активными являются крутопадающие левые сдвиги с азимутом падения 32∠83 и правые сдвиги с азимутом падения 125∠68 [Сим и др., 2017 a, b]. Более поздние полевые исследования дали возможность дополнить базу данных по локальным стресс-состояниям как на южном Сахалине, так и в южной части центрального Сахалина, а также подтвердили устойчивость реконструкции ЛСС.

На основании неотектонических напряжений, реконструированных на северном и центральном Сахалине, произведено районирование областей с разной геодинамической обстановкой формирования разломов в новейший этап (рис. 1 С). На южном Сахалине показано общее поле напряжений этой части острова. Так как структурно-геоморфологический метод основан на закономерностях взаимной ориентировки оперяющих разломов в зоне сдвига, полученных также и по данным моделирования, то обстановка дополнительного растяжения или сжатия, установленная в каждом определенном случае, требует для объяснения причины ее возникновения специальных дополнительных исследований.

Для проверки устойчивости ранее проведенной реконструкции локальных тектонических напряжений в 2019-2020 гг. проведены повторные полевые измерения в 3 пунктах на территории южного Сахалина. Измерения подтвердили наличие локальных сбросовых и сдвиго-сбросовых ЛСС в Невельском районе (восточное крыло Западно-Сахалинского разлома). Кроме того, в точке с координатами 47°01′51.0″ N и 142°30′00.4″ Е (в 9 км от с. Елочки по старохолмской дороге, пересекающей Центрально-Сахалинский разлом) были обнаружены ярко выраженные борозды скольжения (рис. 2). В этой точке обнажения породы красноярковской свиты представлены переслаиванием туфопесчаников и алевролитов. На вставке показаны зеркала скольжения, образованные правым сдвигом, черной стрелкой отмечено направление движения крыльев разрывного нарушения. Большинство борозд скольжения сдвигового типа, что подтверждает общий вывод о доминировании сдвигового режима на южном Сахалине.

Рассматривая современную сейсмичность о. Сахалин, можно отметить, что на п-ове Шмидта она явно менее активна, чем южнее (рис. 1 В). В области растяжения, выделенной нами на рис. 1 С как область А1, очевидно понижение современной сейсмичности как по количеству, так и по магнитудам событий. Это косвенно подтверждает достоверность выделенных нами геодинамических обстановок на о-ве Сахалин, так как в обстановке растяжения сейсмичность должна быть ниже, чем в обстановке сжатия и трехосного напряженного состояния. Это видно по числу событий на перешейке Поясок и вблизи Охинского перешейка, где их заметно меньше, чем вокруг.

Наглядные признаки, подтверждающие субмеридиональное растяжение и субширотное сжатие, выявлены на новообразованной морской террасе в южной части г. Невельск. Эту террасу, возникшую в результате косейсмического поднятия морского дна при Невельском землетрясении 2.08.2007 г., М = 6.2 [Tikhonov, Kim, 2010], можно выделить особо среди объектов исследования. Поднятие земной поверхности достигало 1.2 м вблизи береговой линии. Новообразованная морская терраса (по существу, осушенный бенч, рис. 3) расположена на западном крыле Западно-Сахалинского разлома, на расстоянии 15–20 км от гипоцентра Невельского землетрясения.

Для получения высококачественных фотоснимков террасы и более качественной интерпретации данных в 2020 г. сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН был использован БПЛА DJI Mavic 2 pro. Съемка производилась с высоты 80 м. На фото (рис. 3) очень отчетливо отображается будинаж. Комбинация наземных фотографий и космоснимков, выполненная ранее [Сим и др., 2017с], не позволяла добиться такой

степени детализации отображения этого геологического объекта.

В нижнемиоценовых расслоенных сланцах с прослоями кремнеземистых мергелей отчетливо выражены две системы сколовых трещин. По этим данным с помощью розы-диаграммы трещиноватости (рис. 4 С) восстановлено постмиоценовое поле сдвиговых напряжений с горизонтальными осями растяжения и сжатия. Для реконструкции напряжений использовался метод М. Гзовского [1975].

Будинаж в слое кремнеземистых мергелей (рис. 4), а также ориентация трещин отрыва внутри отдельных будин (рис. 4 D) подтвердили со всей убедительностью, что ось растяжения горизонтальна и ее направление близко к направлению север–юг. Для оценки максимальной деформации растяжения были измерены длина и ширина каждой будины, а также расстояние между соседними будинами в направлении вытянутости (табл. 1).

Уровень деформации растяжения оценивался как отношение расстояния между соседними будинами к полусумме их длин. После усреднения получена оценка постмиоценовой деформации растяжения порядка 200 %. Таким образом, на новообразованной морской террасе (Невельском бенче) имеется несколько индикаторов локальных тектонических напряжений. В результате изучения деформаций геологическими методами, с помощью БПЛА и непосредственных геологических натурных измерений, было восстановлено постмиоценовое поле сдвиговых напряжений с горизонтальными осями растяжения и сжатия. При установке сети реперов по краям будин и промере расстояний с субмиллиметровой точностью этот пункт подходит для геодинамического мониторинга.

Восстановленное по полевым данным изучения индикаторов тектонических напряжений общее поле напряжений южного Сахалина



Рис. 2. Борозды скольжения в обнажениях Красноярковской свиты K_2 kr. **Figure 2.** A slickensides on the outcrops of the Krasnoyarkovskaya formation K_2 kr.



Рис. 3. Панорамное фото невельского бенча с БПЛА DJI Mavic 2 pro. *Фото А.В. Уба* **Figure 3.** Panoramic view of the Nevelsk bench from the DJI Mavic 2 pro drone. *Photo by A.V. Uba*

Будина	Длина, м	Ширина, м	Расстояние до следующей будины, м	Удлинение, %	Примечание	
b1	3.8	0.55	3	69		
b2	4.8	0.95	4.6	80	1-я линия, 30 м восточней линии прибоя	
b3	1.4	0.65	8.3	405		
b4	10.3	1	13.2	117		
b5	2.8	1.05	8.2	213		
b6	4.3	1.25	29.2	526		
b7	7.1	1.3	41	488		
b8	5.1	0.95	23.5	388		
b9	4.1	0.5	2.16	47		
Среднее						
b10	2.16	0.65	2.2	78	2-я линия, 24 м восточнее 1-й	
b11	1.4	0.35	0.7	40		
b12	1.3	0.35	7.4	448		
Среднее	Среднее по 2-й линии 267					
b13	7.4	1.7	5.9	65	3-я линия,	
b14	Р	23 м восточнее 2-й				
b15	1.3	0.92	1.5	68	4-я линия	
b16	>1.6	Ч	26 м от 3-й линии			
Среднее				217		

Таблица	1. Параметры	будин на вновь	образованно	й морской террасо	е и оценки де	еформаций р	астяжения
Table 1. T	The parameters	of the boudins of	on the newly o	ccurred marine ter	race and the	estimates of t	ensile strain

Рис. 4. Индикаторы раннепостмиоценовых напряжений на новообразованной морской террасе (осушенном бенче в южной части г. Невельск). А – Вид на север; В – вид на юг; С – роза-диаграмма трещиноватости на поверхности террасы: ось сжатия, определяемая по биссектрисе между направлениями на максимумы по Гзовскому [1975], направлена по азимуту 92.5°, а ось растяжения – по азимуту 182.5°; D – вид на четыре будины из первой линии (табл. 1) на осушенном бенче и детальный снимок одной из будин (1 на рис. 1 В). Относительное расположение будины, трех минифиордов (mg) и трещин отрыва (обозначены буквами Т-С) в будине b4 из табл. 1. На снимках А и В буквой с обозначены трещины скола.

Figure 4. Indicators of post-early Miocene stresses on the newly formed marine terrace (dried bench in the southern part of the town of Nevelsk). A – northward view; B – southward view; C – rose diagram of jointing on the surface of the terraces: the axis compression, defined by the bisector between the directions of the maxima by Gzovsky [1975], directed along the azimuth 92.5°, and the extension



axes – bearing 182.5° ; D – view over four boudins from the first line (Tab. 1) on a drained bench, and detailed image of one of them (1 in Fig. 1B). The relative position of the boudin, three minigulfs (mg), and tension joints (indicated by the letters T–C) in the b4 boudin from the table 1. In images A and B, the letter c indicates the shear fractures.

представляет собой сдвиговый тип. Оно противоречит проведению границы между Амурской и Охотской плитами на южном Сахалине по Центрально-Сахалинскому разлому [Сим и др., 2016, 2017b]. Ориентация субгоризонтальной оси сжатия по всему Сахалину близка к широтной, это хорошо согласуется с данными других исследователей [Рождественский, 2008]. Исключение составляет северный Сахалин с северо-восточной ориентацией осей сжатия.

Сравнение результатов о постмиоценовых напряжениях с данными GPS/ГЛОНАСС-измерений и геофизических методов

Несомненных интерес представляет сравнение полученных данных об ориентации главных осей сжатия и растяжения с результатами исследований деформации земной поверхности в окрестности активных разломов о. Сахалин по данным GPS/ГЛОНАСС-измерений. Согласно работе [Прытков, Василенко, 2018], геодинамические наблюдения на трех поперечных профилях (по северной, центральной и южной части о. Сахалин) дали исходную информацию о горизонтальных скоростях GPSсмещений и погрешностях их определения, что позволило оценить деформации земной поверхности о. Сахалин. Для расчетов использовался программный пакет GRID STRAIN [Teza et al., 2008]. На рис. 5 показаны расположение пунктов GPS/ГЛОНАСС-измерений, векторы горизонтальных среднегодовых скоростей и результаты расчета горизонтальных деформаций поверхности в северной, центральной и южной частях о. Сахалин. Как видно из рис. 5 В, укорочение земной коры

379



GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

Рис. 5. Горизонтальные скорости в пунктах GPS/ГЛОНАСС-наблюдений о. Сахалин относительно Евразийской плиты (А), а также скорости дилатации и главных осей деформации земной поверхности (В). Верхняя часть – измерения в северной части Сахалина в 2003–2013 гг.; средняя – то же самое в центральной части в 2000–2011 гг.; нижняя часть – то же самое в южной части в 1999– 2009 гг. По данным [Прытков, Василенко, 2018].

Figure 5. Horizontal velocities at the GPS observation points of Sakhalin Island in relation to the Eurasian plate (A), and velocities of dilatation and principal axes of earth surface deformation (B). Upper frame – the measurements in the northern part of Sakhalin during 2003–2013; mid frame – the same in the central part in 2000–2011; bottom frame – the same in the southern part in 1999–2009, according to [Prytkov, Vasilenko, 2018].

Сахалина происходит в основном в субширотном направлении, причем оно несколько меняется от района к району. Неоднородность поля поверхностной деформации проявляется в распределении по площади Сахалина главных осей удлинения и укорочения.

Территория северной части острова (рис. 5 В, верхняя часть) подвержена сжатию в юго-западном направлении. Максимальные скорости деформаций до 130 × 10⁻⁹ в год проявляются в восточной его части (рис. 5 В). Направления скоростей деформаций в целом согласуются с ориентировкой осей сжатия и растяжения восстановленном поле неотектонических R напряжений северного Сахалина (рис. 1 А) [Сим и др., 2017 a, b]. Однако GPS/ГЛОНАССизмерениями не обнаружено области растяжения в этой части острова, в отличие от зоны растяжения севернее 53° с.ш. на рис. 1 А. Для центральной части острова характерны невысокие значения скоростей деформирования земной поверхности, не превышающие $\sim 50 \times 10^{-9}$ в год (рис. 5 В). Хоккайдо-Сахалинский разлом разграничивает территории с разной геодинамической обстановкой: на границе

разлома юго-западное направление осей сжатия сменяется субмеридиональной ориентацией.

В южной части о. Сахалин наряду с доминирующим субширотным сокращением, преобладающим на большей части территории, выделяется область растяжения, лежащая восточнее 143° в.д. (рис. 5 В, нижняя часть). Максимальная скорость деформации укорочения ~ 80×10^{-9} в год. В окрестности Центрально-Сахалинского разлома оси укорочения меняют свое западное направление на северо-западное, а преобладающим режимом деформирования становится растяжение северо-восточного направления. Эта зона не была выявлена при реконструкции неотектонических напряжений из-за недостаточного количества исходных данных для определения ЛСС.

В целом, полученные результаты о напряженно-деформированном состоянии земной коры Сахалина не противоречат результатам глобального проекта TheWorld Stress Map применительно к северо-западной части Тихоокеанского региона, т.е. окружению Сахалина [Heidbach et al., 2018]. В этом проекте учтены данные об очаговых механизмах сахалинских землетрясений, отражающих распределение современных тектонических напряжений и деформаций. Хотя количество таких очаговых механизмов в работе [Heidbach et al., 2018] не велико: для территории Сахалина это порядка 30 определений, но полученная цитируемыми авторами карта с границей между Амурской и Охотской микроплитами представляет определенный интерес. В центральной части острова эта граница проходит вблизи Центрально-Сахалинского разлома (Тымь-Поронайского разлома), а на северном Сахалине она хорошо согласуется с расположением Верхнепильтунского и Набильского разломов. В южной же части острова эта граница проходит существенно западней Западно-Сахалинского разлома. Пространственное распределение афтершоков сильных землетрясений: Горнозаводского, 17.08.2006, М = 5.9, и Невельского, 2.08.2007, M = 6.2, произошедших вблизи Западно-Сахалинского разлома [Tikhonov, Kim, 2010], подтверждает, что этот разлом маркирует предполагаемую границу вдоль западного побережья Сахалина.

Детальный анализ механизмов очагов землетрясений, проведенный в обобщении [Heidbach et al., 2018], выявил преимущественно субширотное сжатие в ориентации современных тектонических напряжений, что соответствует представлениям региональных авторов.

Убедительным аргументом в пользу преобладания режимов горизонтального сжатия и сдвига являются результаты, полученные на основе данных бурения глубоких скважин на севере и юге Сахалина [Каменев и др., 2017]. В этой работе показано, что максимальное субширотное сжатие может превышать вертикальное напряжение в среднем в 1.2-4 раза как на севере, так и на юге Сахалина. Данные кавернометрии скважин также демонстрируют преобладание горизонтального напряжения (субширотного сжатия) над вертикальным. Во многих вертикальных скважинах северного и южного Сахалина стенки исследуемых скважин имеют выраженные обрушения в двух диаметрально противоположных угловых секторах, указывающих направление действия максимального сжатия-растяжения.

Таким образом, на субрегиональном масштабе (100 км и более) можно говорить о соответствии результатов, полученных с помощью разных методов: структурно-геоморфологического, геофизических (данные сейсмологии и каротажа глубоких скважин), а также GPS/ГЛОНАСС-измерений. Для зон с размерами порядка 30 км имеются различия, что определяется сложностью разломной структуры Сахалина, наличием множества локальных разрывов [Воейкова и др., 2008; Рождественский, 1982; Рождественский 2008; Жаров, 2004], а также временем действия (десятки лет) измеряемых современных движений, землетрясений, механизмы которых восстанавливаются за последние 40 лет, и временем формирования рельефа (менее 1.8 млн лет).

Выводы

На основе комплекса тектонофизических методов на Сахалине впервые проведено районирование областей с разной геодинамической обстановкой формирования новейших разломов. Границы этих областей сопровождаются изменчивостью параметров современного поля напряжений. Выборочная проверка ЛСС и новые данные по структурно-геоморфологическим индикаторам в ходе полевых и камеральных работ 2019-2020 гг. подтвердили устойчивость реконструкции ЛСС и схемы районирования Сахалина по геодинамической обстановке. Реконструкция новейших тектонических напряжений Сахалина выявила доминирование сдвигового типа напряженного состояния с субгоризонтальными осями сжатия и растяжения. Ось сжатия ориентирована субширотно, ось растяжения - субмеридионально. Субширотные оси сжатия, восстановленные на центральном и северном Сахалине структурно-геморфологическим методом, разворачиваются на северо-восток. Рассчитанные параметры тектонических напряжений в целом находятся в соответствии с результатами, полученными по механизмам очагов землетрясений, скважинным данным и GPS/ГЛО-НАСС-измерениям деформации поверхности Земли. Таким образом, нельзя говорить о смене сдвигового поля напряжений складчатого этапа на взбросовый на орогенном этапе.

Результаты работ показали неправомочность проведения границы между Амурской и Охотской микроплитами по Центрально-Сахалинскому разлому на южном Сахалине. Здесь она проходит, скорее, по Западно-Сахалинскому разлому.

Список литературы

1. Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. **2007.** *Неотектоника и активные разломы Сахалина*. М.: Наука, 187 с.

2. Гзовский М.В. 1975. Основы тектонофизики. М.: Наука, 535 с.

3. Голозубов В.В., Касаткин С.А., Гранник В.М., Нечаюк А.Е. **2012.** Деформации позднемеловых и кайнозойских комплексов Западно-Сахалинского террейна. *Геотектоника*, 5: 22–43.

4. Гущенко О.И. **1979.** Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений. В кн.: *Поля напряжений в литосфере*. М.: Наука, 7–25.

5. Данилович В.Н. **1961.** *Метод поясов при исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями*. Иркутск: Педагогический институт Иркутского государственного университета, 47 с.

6. Жаров А.Е. **2004.** *Геологическое строение и мел-палеогеновая геодинамика юго-восточного Сахалина.* Южно-Сахалинск: Южно-Сахалинское кн. изд-во, 192 с.

7. Каменев П.А., Богомолов Л.М., Закупин А.С. **2017.** О напряженном состоянии земной коры Сахалина по данным бурения глубоких скважин. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 29–38.

8. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. 2018. Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPS-наблюдений. *Geodynamics & Tectonophysics*, 9(2): 503–514. doi:10.5800/GT-2018-9-2-0358

9. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. **2017.** От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. М.: ГЕОС, 234 с.

10. Рогожин Е.А., Рейснер Г.И., Бесстрашнов Б.М., Стром А.Л., Борисенко Л.С. **2002.** Сейсмотектоническая обстановка острова Сахалин. *Физика Земли*, 3: 1–10.

11. Рождественский В.С. 1982. Роль сдвигов в формировании структуры о. Сахалин. Геотектоника, 4: 99–111.

12. Рождественский В.С. **1997.** Роль сдвигов в формировании структуры Сахалина, месторождений углеводородов и рудоносных зон. В кн.: *Геология и геодинамика Сихотэ-Алинской и Хоккайдо-Сахалинской складчатых областей* (ред. Б.Н. Пискунов). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 80–109.

13. Рождественский В.С. 2008. Активный рифтинг в Японском и Охотском морях и тектоническая эволюция зоны Центрально-Сахалинского разлома в кайнозое. *Тихоокеанская геология*, 27(1): 17–28.

14. Сим Л.А. **1982.** Определение регионального поля по данным о локальных напряжениях на отдельных участках. Известия вузов. Геология и разведка, 4: 35–40.

15. Сим Л.А. 1991. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации). Известия вузов. Геология и разведка, 10: 3–22.

16. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В. **2016.** О возможной границе между Амурской и Охотской микроплитами на Сахалине. В кн.: Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докладов всероссийской конференции, Москва, 3–8 октября 2016 г. М.: ИФЗ РАН, т. 1: 256–263.

17. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. **2017а.** Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(1): 181–202. https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237

18. Сим Л.А., Брянцева Г.В., Саввичев П.А., Каменев П.А. **2017b.** Особенности переходной зоны между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами (на примере напряженного состояния о-ва Сахалин). *Геосистемы переходных зон*, 1(1): 3–22. doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.1.003-022

19. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Кучай О.А., Татаурова А.А. **2017с.** Неотектонические и современные напряжения юга Сахалина. *Тихоокеанская геология*, 36(3): 88–101.

20. Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller K., Reinecker B., Reiter J., Tingay K., Wenzel F., Xie F., Ziegler M., Zoback M.L., Zoback M.D. **2018.** The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744: 484–498. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007

21. Seno T., Sakurai T., Stein S. **1996.** Can the Okhotsk Plate be discriminated from the North American plate? *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B5): 11305–11315. http://dx.doi.org/10.1029/96JB00532

22. Teza G., Pesci A., Galgaro A. **2008.** Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments. *Computers & Geosciences*, 34(9): 1142–1153. doi:10.1016/j.cageo.2007.07.006

23. Tikhonov I.N., Kim Ch.U. **2010.** Confirmed prediction of the 2 August 2007 M_w 6.2 Nevelsk earthquake (Sakhalin Island, Russia). *Tectonophysics*, 485(1–4): 85–93. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.12.002

References

1. Voeykova O.A., Nesmeyanov S.A., Serebryakova L.I. **2007.** [*Neotectonics and active faults of Sakhalin*]. Moscow: Nauka, 187 p. (In Russ.).

2. Gzovsky M.V. 1975. [Fundamentals of Tectonophysics]. Moscow: Nauka, 536 p. (In Russ.).

3. Golozubov V., Kasatkin S., Grannik V., Nechayuk A. **2012.** Deformation of the Upper Cretaceous and Cenozoic complexes of the West Sakhalin terrane. *Geotectonics*, 46: 333–351. doi:10.1134/S0016852112050020

4. Gushchenko O.I. **1979.** [The method of kinematic analysis of destruction structures in reconstruction of the tectonic stress fields]. In: *Polya napryazheniy v litosfere* [*Stress fields in the lithosphere*]. Moscow: Nauka, 7–25. (In Russ.).

5. Danilovich V.N. **1961.** *Metod poyasov pri issledovanii treshchinovatosti, svyazannoy s razryvnymi smeshcheniyami* [*The method of belts in studies of fracturing associated with shearing*]. Irkutsk: Pedagogicheskiy institut Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta, 47 p. (In Russ.).

6. Zharov A.E. **2004.** Geologicheskoe stroenie i mel-paleogenovaya geodinamika yugo-vostochnogo Sakhalina [Geology and Cretaceous-Paleogene geodynamics of southeastern Sakhalin]. Yuzhno-Sakhalinsk: Yuzhno-Sakhalinsk Publ., 192 p. (In Russ.).

7. Kamenev P.A., Bogomolov L.M., Zakupin A.S. **2017.** On the stress state of the Sakhalin crust according to the data of drilling deep boreholes. *Russian J. of Pacific Geology*, 11(1): 25–33. doi:10.1134/S1819714017010043

8. Prytkov A.S., Vasilenko N.F. **2018.** Earth surface deformation of the Sakhalin Island from GPS data. *Geodynamics & Tectonophysics*, 9(2): 503–514. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0358

9. Rebetskiy Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. **2017.** *Ot zerkal skol'zheniya k tektonicheskim napryazheniyam. Metody i algoritmy* [*From slickensides to tectonic stresses. Methods and algorithms*]. Moscow: GEOS, 234 p. (In Russ.).

10. Rogozhin E.A., Reisner G.I., Besstrashnov V.M., Strom A.L., Borisenko L.S. **2002.** Seismotectonic settings of Sakhalin Island. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 38(3): 207–214.

11. Rozhdestvensky V.S. 1982. The role of strike-slip in the structure of Sakhalin. *Geotectonics*, 16: 323–332.

12. Rozhdestvenskiy V.S. **1997.** [The role of strike-slips in formation of Sakhalin structure, hydrocarbon deposites and ore-bearing zones]. In.: *Geologiya i geodinamika Sikhote-Alinskoy i Khokkaydo-Sakhalinskoy skladchatykh oblastey* [*Geology and Geodynamucs of the Sikhote-Alin and Hokkaido-Sakhalin folded regions*] (ed. B.N. Piskunov). Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN [IMGG FEB RAS], 80–109.

13. Rozhdestvensky V.S. **2008.** Active rifting in the Japan and Okhotsk Seas and the tectonic evolution of the Central Sakhalin Fault zone in the Ceinozoic. *Russian J. of Pacific Geology*, 2(1): 15–24.

14. Sim L.A. **1982.** [Determination of the regional field by the data on the local stresses in separate areas]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka [Geology and exploration]*, 4: 35–40.

15. Sim L.A. **1991.** [Studies ot tectonic stresses based on geological indicators (methods, results, recommendations)]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka* [*Geology and exploration*], 10: 3–22.

16. Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V. **2016.** [On possible border between the Amur and Okhotsk microplates on Sakhalin]. In.: *Chetvertaya tektonofizicheskaya konferentsiya v IFZ RAN. Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle, Moscow, 3–8 Oct. 2016 [The 4th Tectonophysical conference in the IPE RAS. Tectonophysics and topical problems in Earth sciences, Moscow, 3–8 October, 2016]. Moscow: IFZ RAN, vol. 1: 256–263.*

17. Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A. **2017a.** Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(1): 181–202. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237

18. Sim L.A., Bryantseva G.V., Savvichev P.A., Kamenev P.A. **2017b.** Patterns of transition zone between Eurasian and North American plates (by example of stressed state of the Sakhalin Island). *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 1(1): 3–22. (In Russ.). doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.1.003-022

19. Sim L.A., Bogomolov L.M., Kuchai O.A., Tataurova A.A. **2017c.** Neotectonic and modern stresses of South Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology*, 11(3): 223–235. https://doi.org/10.1134/s1819714017030058

20. Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller K., Reinecker B., Reiter J., Tingay K., Wenzel F., Xie F., Ziegler M., Zoback M.L., Zoback M.D. **2018.** The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744: 484–498. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007

21. Seno T., Sakurai T., Stein S. **1996.** Can the Okhotsk Plate be discriminated from the North American plate? *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B5): 11305–11315. http://dx.doi.org/10.1029/96JB00532

22. Teza G., Pesci A., Galgaro A. **2008.** Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments. *Computers & Geosciences*, 34(9): 1142–1153. doi:10.1016/j.cageo.2007.07.006

23. Tikhonov I.N., Kim Ch.U. **2010.** Confirmed prediction of the 2 August 2007 M_w 6.2 Nevelsk earthquake (Sakhalin Island, Russia). *Tectonophysics*, 485(1–4): 85–93. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.12.002

Об авторах

СИМ Лидия Андреевна (ORCID 0000-0003-0267-2241), доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, sim@ifz.ru

КАМЕНЕВ Павел Александрович (ORCID 0000-0002-9934-5855), кандидат технических наук, старший научный сотрудник ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, p.kamenev@imgg.ru

БОГОМОЛОВ Леонид Михайлович (ORCID 0000-0002-9124-9797), доктор физико-математических наук, директор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, l.bogomolov@imgg.ru

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.8.05 (265.53)

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.384-392

Применение сейсморазведки высокого разрешения для поисков локальных газовых аномалий на Южно-Киринском нефтегазоконденсатном месторождении

© 2020 В. К. Лексин

ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», Южно-Сахалинск, Россия E-mail: lex-vasya@mail.ru

Резюме. Поиски локальных газовых аномалий в акваториях необходимы для повышения безопасности строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. В статье изложены результаты исследований в 2010–2017 гг. геологических опасностей на Южно-Киринском нефтегазоконденсатном месторождении с применением сейсморазведки высокого разрешения. Построены новые высококачественные сейсмические разрезы, приведенные к единому виду и уровню, что позволило выполнить корреляцию отражающих горизонтов и картировать геологические опасности на пересекающихся площадках исследований разных лет. По результатам интерпретации сейсмических разрезов обнаружены локальные аномалии в верхней части разреза, свидетельствующие о наличии газа. По структурным особенностям напластования на сейсмических разрезах обнаружен турбидитовый поток на глубине 900 м от морского дна с шириной 1000 м и протяженностью более 2.5 км. Выявлены корреляционные зависимости между амплитудой на сейсмическом разрезе и значением содержания метана (С1) в промывочной жидкости на каротажной диаграмме. Итогом работы служит впервые построенная сводная карта всех геологических опасностей в пределах Южно-Киринского нефтегазоконденсатного месторождения, обнаруженных в результате интерпретации сейсмических разрезов.

Ключевые слова: геологические опасности, сейсморазведка высокого разрешения, сейсмический разрез, газовые аномалии

Application of high resolution seismic to search for local gas anomalies in the South Kirinskoye oil and gas condensate field

Vasilii K. Leksin

«RN-SakhalinNIPImorneft» Limited Liability Company, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia E-mail: lex-vasya@mail.ru

Abstract. Searches for local gas anomalies in water areas are necessary to improve the safety of the construction of offshore oil and gas production facilities. The article presents the results of studies of geological hazards at the South Kirinskoye oil and gas condensate field using high resolution seismic from 2010 to 2017. New high-quality seismic sections, reduced to a single type and level, were built, which allowed to make a correlation of reflecting horizons and map geological hazards at intersecting research sites of different years. Based on the results of the interpretation of seismic sections, local anomalies were found in the upper part of the section, indicating the presence of gas. By the structural features of the bedding in the channel on seismic sections, a turbidite flow was detected at a depth of 900 m from the seabed with a width of 1000 m and a length of more than two and a half kilometers. Correlations between the amplitude on the seismic section and the value of methane content (C1) in the drilling fluid on the log were revealed. The result of the work is the first compiled consolidated map of all geological hazards within the South Kirinskoye oil and gas condensate field, discovered as a result of the interpretation of seismic sections.

Keywords: geological hazards, high resolution seismic, seismic section, gas anomalies

Для цитирования: Лексин В.К. Применение сейсморазведки высокого разрешения для поисков локальных газовых аномалий на Южно-Киринском нефтегазоконденсатном месторождении. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 4, с. 384–392. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.384-392

For citation: Leksin V.K. Application of high resolution seismic to search for local gas anomalies in the South Kirinskoye oil and gas condensate field. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 384–392. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.384-392

Введение

Северо-восточный шельф о. Сахалин, где располагается исследуемое Южно-Киринское нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ), характеризуется многообразием геологических опасностей: разрывные нарушения, палеоврезы, турбидитовый поток, зоны распространения газовых карманов, газогидраты, покмарки, оползневые отложения [Веселов и др., 2006; Гаврилов, 2009; Акуличев и др., 2014; Баранов и др., 2015; Керимов и др., 2015; Богоявленский и др., 2016; Петренко и др., 2017; Рыбальченко и др., 2017; Лексин и др., 2018; Новиков, 2018; Голубин и др., 2019; Дзюбло и др., 2019]. Поиску геологических опасностей с использованием сейсмоакустических методов в различных акваториях посвящены, например, работы [Иванов и др., 2016; Миронюк и др., 2017; Лаломов и др., 2019].

С 2010 г. на Южно-Киринском НГКМ выполняются комплексные изыскания, включающие батиметрическую съемку, гидролокацию бокового обзора, гидромагнитную съемку, непрерывное сейсмоакустическое профилирование, сейсморазведку высокого разрешения (СВР), отбор проб донных грунтов (глубина опробования до 4 м), гидрометеорологические наблюдения и экологические исследования для постановки полупогружной плавучей буровой установки (ППБУ) на точку для бурения поисково-разведочных скважин.

Ежегодные исследования в течение 8 лет методом сейсморазведки высокого разрешения с 2010 по 2017 г. в пределах Южно-Киринского НГКМ позволили накопить большой объем сейсмических данных – свыше 8000 погонных километров для выбора безопасных участков при бурении поисково-разведочных скважин. Ежегодно собираемые и обрабатываемые разными исполнителями данные СВР на разных площадках месторождения носили локальный характер без привязки к единой системе. В связи с этим построенные в разные годы сейсмические разрезы не давали возможности провести корреляцию отражающих горизонтов и геологических опасностей на пересекающихся площадках (рис. 1).

Сейсморазведка высокого разрешения на каждой из площадок проводилась по методике продольного профилирования методом отраженных волн в модификации общей глубинной точки [Sheriff, Geldart, 1983; Yilmaz, 2001; Телегин, 2004] с 48-кратным перекрытием. Расстояние между основными профилями составляло 100 м, между секущими профилями – 500 м. Съемка проводилась при скорости судна в пределах 3.5–4.5 узла относительно воды по судовому лагу.

Краткое описание графа обработки

Обработка сейсмических данных выполнялась с использованием единого графа обработ-



Рис. 1. Обзорная карта-схема с контурами площадок, на которых проводилась сейсморазведка высокого разрешения. **Figure 1.** Overview sketch map with the contours of the sites, on which the high resolution seismic was carried out.

ки. Кроме основных процедур были применены также детерминистическая нуль-фазовая деконволюция по сигнатуре в ближней зоне, компенсация аппаратурной задержки, ослабление когерентных помех до суммирования, устранение влияния углов наклона границ (частичная миграция), расчет нуль-фазового фильтра по найденному импульсу.

Исходные сейсмические данные характеризуются наличием шумов, обусловленных

волнением моря и экранирующим эффектом дна. Для района исследований существенное влияние на формирование волнового поля оказывает наличие газонасыщенных зон и пропластков в верхней части разреза.

Процедуры, входящие в граф обработки сейсмических данных, позволили редактировать «шумы» в трассах, подавить донно-кратные и многократные волны, увеличить разрешенность полезных волн (рис. 2, 3).



Рис. 2. Пример программного редактирования данных. Фрагмент разреза ОГТ до (слева) и после (справа) редактирования. Figure 2. An example of program data editing. Fragment of the CDP section before (left) and after (right) editing.

Рис. 3. Скоростной анализ до (слева) и после (справа) Radon Filter. **Figure 3.** Velocity analysis before (left) and after (right) Radon Filter.

На временных разрезах, предназначенных для миграции, данные обязательно должны быть приведены к общей точке отражения. Эта операция, которая называется еще частичной миграцией или устранением влияния углов наклона границ, выполнялась процедурой Dip Move Out (DMO). Для выполнения DMO была выбрана программа Ensemble DMO in T-X Domain, а для миграции после суммирования – программа Steep Dip Explicit FD Time Mig. В результате обработки сейсмических данных получены высококачественные сейсмические мигрированные разрезы. Для оценки формы импульса по полученному разрезу использовалась центральная, полнократная часть разреза и временной интервал 500-1500 мс.

Сейсмические разрезы с едиными параметрами обработки, приведенные к одному виду и уровню, позволили выполнить корреляцию отражающих горизонтов и картировать геоло-





Figure 4. Fragment of a seismic section illustrating the intersection of reflecting horizons and amplitude anomalies on seismic profiles worked out in different years. For other legend see Figure 5.

гические опасности на пересекающихся площадках исследований разных лет (рис. 4).

На фрагменте сейсмического разреза хорошо прослеживаются отражающие горизонты и амплитудная аномалия на разных сейсмических профилях.

Выделение геологических опасностей

По результатам построения сейсмических разрезов была проведена детальная интерпретация на основе сейсмогеологической модели из 13 сейсмических комплексов, разделенных 13-ю отражающими горизонтами (рис. 5).

Такая модель позволила описать потенциально опасные для проведения буровых работ объекты наиболее подробно. Отражающий горизонт Sg12 использован для проецирования на него разрывных нарушений.

Для обнаружения аномальных объектов по каждому сейсмическому комплексу проведен динамический анализ в специализированном программном обеспечении, в результате по каждому комплексу получены наборы данных о максимальной и минимальной пиковой амплитуде. Для оценки степени опасности обнаруженных аномалий, помимо определения амплитуды, эти участки визуально просматривались на сейсмических разрезах для



Рис. 5. Фрагмент сейсмического мигрированного временного разреза с выделенными 13-ю отражающими горизонтами.

Figure 5. Fragment of a seismic migrated time section with 13 reflective horizons highlighted.

выявления признаков, свидетельствующих о возможном наличии газа – таких как смена фазы, наличие питающего канала, снижение частоты, наличие искажения (ложного прогибания) всех нижележащих границ [Гайнанов, 2008; Хилтерман, 2010].

Интерпретация сейсмических данных позволила достаточно уверенно выделить на сейсмических разрезах локальные газовые аномалии, разрывные нарушения и турбидитовый поток (рис. 6, 7).

Распознаваемая фронтальная часть турбидитового потока шириной 1000 м и протяженностью более 2.5 км может представлять опасность. Это обусловлено тем, что при наличии такого тела возможно возникновение аномально высоких пластовых давлений. А в случае если это тело сложено песчаными разностями, оно может быть хорошим коллектором для скопления значительного количества газа и также может осложнять проведение буровых работ.



Рис. 6. Фрагменты сейсмического мигрированного временного разреза, показывающие аномалии, связанные с газонасыщением в месте заложения проектной скважины 6 (верхний фрагмент) и скважины 1 (нижний фрагмент). Разноцветные «плюсики» – поперечные сейсмические разрезы с увязанными отражающими горизонтами.

Figure 6. Fragments of a seismic migrated time section showing anomalies associated with gas saturation at the location of the planned well 6 (upper) and well 1 (lower). Multicolored "pluses" – transverse seismic sections with associated reflective horizons.

Исследование амплитудных аномалий совместно с данными газового каротажа

Для Южно-Киринского месторождения впервые исследованы амплитудные аномалии по данным сейсморазведки высокого разрешения с идентификацией их в пробуренных скважинах с учетом данных газового каротажа. Для совместной интерпретации были использованы данные газового каротажа скважин ЮК-5 и ЮК-6. Скважина ЮК-6 отличается самым высоким содержанием газа в промывочной жидкости. Согласно сейсмическому разрезу, скважина пересекает максимальную амплитудную аномалию на времени порядка 940 мс, что соответствует глубине 815 м. На диаграмме газового каротажа в этой точке зарегистрировано минимальное значение содержания С1 в промывочной жидкости. Это, вероятней всего, свидетельствует о том, что аномальный объект до отражающего горизонта Sg11 следует интерпретировать как пласт глинистых

> пород с песчаными прослойками, который по сравнению с вмещающими толщами характеризуется меньшим объемом порового пространства и, соответственно, меньшим содержанием газа. Такой глинистый пласт может выступать в роли покрышки, накапливать под собой газ и быть потенциально опасным при проходке скважины. Каротажная газовая диаграмма дополняет сейсмический разрез в интервале времен от 730 до 1120 мс, соответствующем интервалу глубин от 610 до 1000 м. Значения содержания С1 колеблются в пределах от 2,4 до 4,8 % (рис. 8). Таким образом, совместная интерпретация сейсмических и газокаротажных данных существенно повышает результативность выявления геологических опасностей, связанных с газопроявлениями при бурении скважин на нефтегазоносных площадях.

В результате интерпретации сейсмических разрезов построена карта геологических опасностей в пределах Южно-Киринского НГКМ (см. карту).

Геосистемы переходных зон 2020, 4 (4): 384–392



Рис. 7. Пример интерпретации разреза, показывающий турбидитовое тело. Красные вертикальные линии – разрывные нарушения.

Figure 7. An example of a section interpretation showing turbidite body. Red vertical lines – faults.



Рис. 8. Фрагмент интерпретации данных СВР с данными газового каротажа на участке пробуренной скважины ЮК-6. Красные вертикальные линии – разрывные нарушения.

Figure 8. Fragment of interpretation of high resolution seismic data with gas logging data in the area of the drilled well SK-6. Red vertical lines – faults.

На карту геологических опасностей вынесены аномальные зоны каждого сейсмического комплекса, разрывные нарушения, турбидитовый поток, которые необходимо учитывать при строительстве скважин.

Заключение

На основе данных сейсморазведки высокого разрешения были идентифицированы и откартированы все обнаруженные геологические опасности, которые необходимо учитывать при строительстве скважин на Южно-Киринском нефтегазоконденсатном месторождении. Проектные скважины в той или иной степени «заражены» газовыми скоплениями различного типа и генезиса. Для исключения риска выбросов приповерхностного газа при проходке верхней части разреза в местах аномальных зон, обозначенных на карте, требуется изменение точки заложения скважины. Наиболее опасным при проходке скважины является интервал 0-100 м от морского дна при наличии газа в разрезе, в связи с этим изменение точки заложения проектной скважины неизбежно при любом риске. При залегании локальных газовых аномалий свыше 100 м от морского дна применяются дополнительные технологии при бурении, такие, например, как использование цементных растворов с газоблокирующими добавками.

В результате совместной интерпретации сейсмических и газокаротажных данных выявлено, что минимальное значение содержания метана на каротажной диаграмме соответствует максимальной амплитуде на

сейсмическом разрезе.

Развитие методов поиска геологических опасностей в акваториях, включая усовершенствование геофизического оборудования, программных средств обработки и интерпретации сейсмических данных, позволит в перспективе повысить качество выявления геологических опасностей и тем самым, во избежание экологических катастроф, уменьшить риск аварий при строительстве скважин.

По результатам сейсморазведки высокого разрешения и непрерывного сейсмоакустического профилирования на Южно-Киринском НГКМ было успешно выполнено бурение семи поисково-разведочных скважин.





Список литературы

1. Акуличев В.А., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б., Мальцева Е.В., Гресов А.И., Телегин Ю.А. **2014.** Условия формирования газогидратов в Охотском море. Доклады Академии наук, 454(3): 340–342. http://doi.org/10.7868/S0869565214030165

2. Баранов Б.В., Дозорова К.А., Рукавишникова Д.Д. **2015.** Опасные геологические процессы на восточном склоне острова Сахалин. *Океанология*, 55(6): 1001–1005. http://doi.org/10.7868/S0030157415060027

3. Богоявленский В.И., Керимов В.Ю., Ольховская О.О., Мустаев Р.Н. 2016. Повышение эффективности и безопасности поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа на акватории Охотского моря. *Территория Нефтегаз*, 10: 24–32.

4. Веселов О.В., Гордиенко В.В., Куделькин В.В. **2006.** Термобарические условия формирования газогидратов в Охотском море. *Геология и полезные* ископаемые Мирового океана, 4: 42–65.

5. Гаврилов А.А. **2009.** Роль разрывных нарушений в формировании береговых линий Охотского и Японского морей (ст. 1. Региональный аспект исследований). *Геоморфология*, 3: 38–49.

6. Гайнанов В.Г. **2008.** Об использовании динамических параметров записи при сейсмоакустическом профилировании. *Вестник Московского университета*, Сер. 4, Геология, 5: 33–39.

7. Голубин С.И., Савельев К.Н., Новиков А.Н. **2019.** Оценка геологических опасностей при эксплуатационном мониторинге объектов морских месторождений шельфа острова Сахалин. *Газовая промышленность*, S1 (782): 30–35.

8. Дзюбло А.Д., Воронова В.В., Перекрестов В.Е. **2019.** Исследование приповерхностного газа шельфа о. Сахалин и минимизация рисков при строительстве морских скважин. *Вестник Ассоциации буровых подрядчиков*, 3: 20–25.

9. Иванов Г.И., Казанин А.Г., Саркисян М.В., Ланцев В.В., Некрылов Н.Т., Ионов В.Ю., Павлов С.П., Макаров Е.С. **2016.** Сейсмика высокого разрешения – новый шаг вперед при изучении опасных геологических процессов. *Нефть. Газ. Новации*, 1: 65–68.

10. Керимов В.Ю., Сизиков Е.А., Синявская О.С., Макарова А.Ю. **2015.** Условия формирования и поиски залежей УВ в турбидитовых коллекторах Охотского моря. *Нефть, газ и бизнес,* 2: 32–37.

11. Лаломов Д.А., Коршунов Д.А., Мусин М.В., Разматова А.В. **2019.** Районирование участков распространения свободного газа в Обской губе на основе статистического анализа данных сейсмоакустических исследований. *Инженерные изыскания*, 3: 50–59.

12. Лексин В.К., Самарин В.И., Лисковый П.Н. **2018.** Результаты интерпретации сейсмических разрезов при инженерных изысканиях в пределах Южно-Киринского нефтегазоконденсатного месторождения (шельф о. Сахалин). Инженерные изыскания, 9-10: 64–73.

13. Миронюк С.Г., Росляков А.Г., Семенова А.А., Шарипов М.Ш. 2017. Использование высокоразрешающей сейсморазведки для выявления геологических опасностей в различных геоморфологических зонах Черного моря. Инженерные изыскания, 1: 54–60.

14. Новиков А.А. **2018.** Специфика проведения комплексных морских инженерных изысканий и оценка опасностей геологических процессов под объекты подводного добычного комплекса шельфовых месторождений Киринского блока о. Сахалин. *Газовая промышленность*, 9: 42–48.

15. Петренко В.Е., Оганов Г.С., Свиридова Т.А. **2017.** Приповерхностный газ: риски и варианты технико-технологических решений при проектировании строительства скважин на морском шельфе. *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*, 2: 21–27.

16. Рыбальченко В.В., Гоговенков Г.Н., Слепченко В.С. **2017.** Вертикальная миграция газа и газогидраты на северо-восточном шельфе Сахалина. *Геология нефти и газа*, 2: 38–51.

17. Телегин А.Н. 2004. Морская сейсморазведка. М.: ООО «Геоинформмарк», 237 с.

18. Хилтерман Ф.Дж. **2010**. Интерпретация амплитуд в сейсморазведке. Тверь: Издательство ГЕРС, 256 с. 19. Sheriff R.E., Geldart L.P. **1983**. *Exploration Seismology*. 2: *Data – processing and interpretation*. London: Cambridge University Press, 231 p.

20. Yilmaz O. **2001.** *Seismic data analysis – processing, inversion, and interpretation of seismic data.* Tulsa: SEG, 2025 p. https://doi.org/10.1190/1.9781560801580

References

1. Akulichev V.A., Obzhirov A.I., Shakirov R.B., Maltseva E.V., Gresov A.I., Telegin Yu.A. **2014.** Conditions of gas hydrate formation in the Sea of Okhotsk. *Doklady Earth Sciences*, 454(1): 94–96. https://doi.org/10.1134/s1028334x14010164

2. Baranov B.V., Dozorova K.A., Rukavishnikova D.D. **2015.** Hazardous geological processes on the eastern slope of Sakhalin. *Oceanology*, 55(6): 906–909. http://doi.org/10.7868/S0030157415060027

3. Bogoyavlensky V.I., Kerimov V.Yu., Olkhovskaya O.O., Mustaev R.N. **2016.** Improving the efficiency and safety prospecting, exploration and development of oil and gas in the Sea of Okhotsk. *Territoriya Neftegaz* [Oil and gas territory], 10: 24–32. (In Russ.).

4. Veselov O.V., Gordienko V.V., Kudelkin V.V. **2006.** [Thermobaric conditions for the formation of gas hydrates in the Sea of Okhotsk]. *Geology and Mineral Resources of World Ocean*, 4: 42–65. (In Russ.).

5. Gavrilov A.A. **2009.** The role of faults in the formation of the coastlines of the Okhotsk Sea and Sea of Japan (paper 1. Regional aspect of studies). *Geomorfologiya*, 3: 38–49. (In Russ.).

6. Gaynanov V.G. **2008.** [On the use of dynamic recording parameters in seismoacoustic profiling]. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriia 4, Geologiia = Moscow University Geology Bull.*, 5: 33–39. (In Russ.).

7. Golubin S.I., Saveliev K.N., Novikov A.N. **2019.** Estimation of geological hazards in the operational monitoring of offshore fields of Sakhalin Island. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry Magazine*, S1 (782): 30–35. (In Russ.).

8. Dzyublo A.D., Voronova V.V., Perekrestov V.E. **2019.** Research shallow gas of Sakhalin shelf and minimize risks during offshore wells construction. *Vestnik Assotsiatsii burovykh podryadchikov = Bull. of the Association of Drilling Contractors*, 3: 20–25. (In Russ.).

9. Ivanov G.I., Kazanin A.G., Sarkisyan M.V., Lantsev V.V., Nekrylov N.T., Ionov V.Yu., Pavlov S.P., Makarov E.S. **2016.** [High-resolution seismics – a new step forward in the study of geological hazards]. *Neft. Gaz. Novatsii.* [Oil. Gas. Innovations], 1: 65–68. (In Russ.).

10. Kerimov V.Y., Sizikov E.A., Sinyavskaya O.S., Makarova A.Y. **2015.** The conditions of the formation and the searching of hydrocarbon deposits in the turbidite reservoirs on the Okhotsk offshore. *Neft'*, *gaz i biznes* [*Oil, Gas and Business*], 2: 32–37. (In Russ.).

11. Lalomov D.A., Korshunov D.A., Musin M.V., Razmatova A.V. **2019.** Regionalization of shallow gas distribution sites in the gulf of Ob based on statistical analysis of seismoacoustic data. *Inzhenernye izyskaniya* = *Engineering Survey*, 13(3): 50–59. (In Russ.).

12. Leksin V.K., Samarin V.I., Liskovyi P.N. **2018.** Results of interpretation of seismic during engineering surveys within of the South-Kirinskoye oil and gas condensate field (shelf of Sakhalin Island). *Inzhenernye izyskaniya* = *Engineering Survey*, 12(9–10): 64–73. (In Russ.).

13. Mironyuk S.G., Roslyakov A.G., Semenova A.A., Sharipov M.S. **2017.** Using high-resolution seismics for identification of geological hazards in various geomorphological zones of the Black sea. *Inzhenernye izyskaniya* = *Engineering Survey*, 1: 54–60. (In Russ.).

13. Novikov A.A. **2018.** Specifics of the integrated offshore geotechnical investigations and estimation of geological hazards for objects of the subsea production system of the offshore fields of Kirinsky block of Sakhalin Island. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry Magazine*, 9: 42–48. (In Russ.).

15. Petrenko V.E., Oganov G.S., Sviridova T.A. **2017.** Shallow gas: risks and variants of technical-technological solutions when projecting construction of offshore wells. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* = *Equipment and technologies for oil and gas complex*, 2: 21–27. (In Russ.).

16. Rybalchenko V.V., Gogonenkov G.N., Slepchenko V.A. **2017.** Vertical gas migration and gas hydrates in the northeast shelf of Sakhalin. *Oil and Gas Geology*, 2: 38–51. (In Russ.).

17. Telegin A.N. 2004. [Marine seismic exploration]. Moscow: Geoinformmark, 237 p. (In Russ.).

18. Hilterman F.J. **2010.** *Interpretation of amplitudes in seismic exploration*. Tver: Publ. House of the GERS, 256 p. (In Russ.). (Translation from: Hilterman F.J. **2001.** Seismic amplitude interpretation. Society of Exploration Geophysicists, 236 p.).

19. Sheriff R.E., Geldart L.P. **1983.** *Exploration Seismology.* 2: *Data – processing and interpretation.* London: Cambridge University Press, 231 p.

20. Yilmaz Öz. **2001.** *Seismic data analysis – processing, inversion, and interpretation of seismic data.* Tulsa: SEG, 2025 p. https://doi.org/10.1190/1.9781560801580

Об авторе

ЛЕКСИН Василий Константинович (ORCID 0000-0003-2635-9882), руководитель группы морских изысканий, ООО «PH-CaxaлинНИПИморнефть», Южно-Caxaлинск, lex-vasya@mail.ru

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.34.094

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446

О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии

© 2020 Н. А. Сычева¹, Л. М. Богомолов^{*2}

¹Научная станция РАН в г. Бишкеке, Киргизия ²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: bleom@mail.ru

Резюме. Обобщены данные о сброшенных напряжениях и приведенной сейсмической энергии для землетрясений Северной Евразии. Анализируются взаимосвязи этих параметров с сейсмическим моментом и магнитудой. Проведены детализационные исследования для Северного Тянь-Шаня (Бишкекского геодинамического полигона), получены значения динамических параметров очагов для 183 землетрясений разных энергетических классов (K = 8.7-14.8): угловой частоты, параметра спектральной плотности, скалярного сейсмического момента, радиуса очага, уровня сброшенных напряжений, сейсмической энергии и приведенной сейсмической энергии. Для расчета радиуса очага и сброшенных напряжений использованы две модели – подход Брюна и улучшенная модель Мадариаги–Канеко–Ширера. Для относительно слабых событий установлена степенная зависимость (регрессия) сброшенных напряжений от скалярного сейсмического момента M_0 , что согласуется с результатами о степенной зависимости от M_0 приведенной сейсмической энергии в ряде других регионов Северной Евразии. Отмечена связь между видом очаговой подвижки и уровнем сброса напряжений.

Ключевые слова: очаг землетрясения, магнитуда, сейсмический момент, сброс напряжений, приведенная сейсмическая энергия, масштабные зависимости

On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy

Nailia A. Sycheva¹, Leonid M. Bogomolov^{*2}

¹Research Station RAS in Bishkek city, Kyrgyzstan ²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: bleom@mail.ru

Abstract. A generalization of the results on the stress drop and the specific seismic energy for the earthquakes in Northern Eurasia has been made. The relationship of these parameters with the seismic moment and the magnitude has been analyzed. Detailed studies for the Northern Tien Shan (Bishkek geodynamic polygon) were carried out, the values of the dynamic parameters of the sources for 183 earthquakes of various energy classes (K = 8.7-14.8) were obtained: angular frequency, spectral density parameter, scalar seismic moment, source radius, stress drop level, seismic energy and specific seismic energy. Two models have been used to compute the source radius and the stress drop – the Brune approach and the improved Madariaga–Kaneko–Shearer model. For relatively weak events, a power-law dependence (regression) of the stress drop on the scalar seismic moment M_0 has been identified, that complies with the results on the power-law dependence of the specific seismic energy on M_0 in a number of other regions of Northern Eurasia. The relationship between the type of source movement and the stress drop level has been noted as well.

Keywords: earthquake source, magnitude, seismic moment, stress drop, specific seismic energy, scaling dependence

Для цитирования: Сычева Н.А., Богомолов Л.М. О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 4, с. 393–446. (На рус. и англ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446

For citation: Sycheva N.A., Bogomolov L.M. On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 393-446. (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446

Благодарности

Авторы выражают признательность Ю.А. Ребецкому за обсуждение и ценные советы по ходу работы.

Введение

Динамические параметры (ДП) очагов землетрясений: скалярный сейсмический момент M_0 , излученная сейсмическая энергия E_s , радиус очага r (радиус Брюна) и сброшенные касательные напряжения (stress drop, $\Delta \sigma$) – могут характеризовать региональные особенности геодеформационного процесса. Создание современных сейсмических сетей и развитие методов обработки сейсмограмм сделало возможным в настоящее время определять ДП даже для слабых землетрясений [Добрынина, 2009; Пустовитенко, 2013; Parolai et al., 2007; и др.]. Для некоторых регионов, в частности Северного Тянь-Шаня, вовлечение очагов слабых землетрясений в расчет динамических параметров позволило «накопить статистику» событий с найденными значениями ДП, выявлять их корреляционные свойства и закономерности распределений ДП [Сычева, Богомолов, 2016; Baltay et al., 2011]. При формировании банков данных по динамическим параметрам с числом записей более 100 (что лишь в несколько раз меньше полного числа событий в том же диапазоне магнитуд) можно говорить о массовых определениях ДП [Сычева, Богомолов, 2016].

Соотношениям динамических параметров очагов в различных регионах, в частности поиску корреляций между значениями радиуса очага r, момента M_0 и магнитуды M посвящено большое число работ [Кочарян, 2014; Abercrombie, Leary, 1993; Allmann, Shearer, 2009; Baltay et al., 2011; Shaw et al., 2015; Pacor et al., 2016]. Для различных сейсмоактивных регионов установлены соответствующие им соотношения, которые, как правило, представляют собой линейные зависимости в логарифмическом масштабе (см., например, обзор [Кочарян, 2014]).

Наиболее известными среди таких соотношений можно считать среднюю корреляционную зависимость из [Ризниченко, 1985] между M и M_0 (H·м):

$$\lg M_0 = 1.6M + 8.4 \tag{1}$$

и численно близкую к ней зависимость Канамори [Kanamori, 1977], эквивалентную выражению (1), для моментной магнитуды M_w :

$$\lg M_0 = 1.5 M_w + 9.1$$
, где M_0 (H·м). (2)

В недавней работе [Сычева, 2020] на примере Бишкекского геодинамического полигона (БГП), Северный Тянь-Шань, было показано, что корреляционные соотношения такого вида выполняются и для диапазона магнитуд $M \ge 2.7$ (с доверительной погрешностью до 10 %).

Вопрос о корреляции между значениями радиуса очага и магнитудой события, а также между сброшенными напряжениями и магнитудой изучен в меньшей степени. Для случая сброшенных напряжений даже само наличие такой корреляции неочевидно из-за большого разброса значений Δσ для событий с близкими магнитудами. В ряде работ, основанных на современных данных [Baltay et al., 2011; Shaw et al., 2015; и др.], не выявлено значимых взаимосвязей между сброшенными напряжениями и сейсмическим моментом (и, как следствие, с магнитудой землетрясения). Результаты других работ подтвердили такую взаимосвязь, но дали различные тренды изменения Δσ (нарастающий или убывающий) с увеличением М или $M_{\rm w}$. Примером «интуитивно» ожидаемого нарастающего тренда $\Delta \sigma(M_0)$ может быть результат, полученный в [Pacor et al., 2016] для сейсмоактивного региона Абруццо (Abruzzo, Центральная Италия), включающего эпицентральную зону катастрофического землетрясения Л'акуила 06.04.2009, $M_{\rm w} = 6.1$. В работе же [Candela et al., 2011] на основе анализа разломных зон во Французских Альпах и Неваде, США, аргументировано, что по крайней мере в этих регионах усредненная зависимость $\Delta \sigma(M_0)$ слабоспадающая ($\Delta \sigma \sim M_0^{-0.15}$), а не нарастающая. Таким образом, даже характер зависимости $\Delta \sigma(M_0)$ пока не установлен однозначно.

GEOPHYSICS, SEISMOLOGY

В многочисленных работах, посвященных проблеме самоподобия сейсмических очагов [библиографию см., например, в [Кочарян, 2014]), внимание фокусировалось на масштабной зависимости приведенной сейсмической энергии, $e_{\rm PR}$, представляющей собой отношение излученной сейсмической энергии $E_{\rm s}$ к сейсмическому моменту $M_{\rm o}$:

$$e_{\rm PR} = E_{\rm S} / M_0 = \sigma_{\rm a} / G, \qquad (3)$$

где G – модуль сдвига, σ_a – так называемое кажущееся напряжение (apparent stress), смысл которого поясняется ниже.

Было продемонстрировано [Кочарян, 2016], что зависимость $e_{\rm PR}$ от M_0 является слабонарастающей и хорошо описывается степенной функцией вида $(M_0)^{\alpha}$, $0 < \alpha < 1$. Но при этом взаимосвязь параметров $e_{\rm PR}$ и $\Delta \sigma$ практически не анализировалась. В данной работе ниже будет показано, что значения сброшенных напряжений и приведенной сейсмической энергии пропорциональны друг другу, т.е. между этими величинами имеется физическая взаимосвязь. Это позволяет использовать данные о зависимости $e_{\rm PR}$ от сейсмического момента для анализа вопроса об усредненной зависимости (тренде) $\Delta \sigma(M_0)$.

Наличие нарастающей степенной зависимости сброшенных напряжений от сейсмического момента также подтверждено при анализе динамических параметров очагов землетрясений [Сычева, Богомолов, 2016], произошедших в Северном Тянь-Шане внутри области 41–43° с.ш. и 73–77° в.д., называемой Бишкекским геодинамическим полигоном.

Данная работа является продолжением и детализацией исследования [Сычева, 2020], где рассматривались динамические параметры землетрясений на более широкой территории, называемой Центральным Тянь-Шанем. Стоит отметить, что разделение на Центральный, Западный и Восточный Тянь-Шань проводится по долготе, и нет противоречия при отнесении территории БГП (часть Северного Тянь-Шаня) к Центральному Тянь-Шаню. В работе [Сычева, 2020] были рассчитаны динамические параметры для 150 землетрясений Центрального Тянь-Шаня; построены регрессионные зависимости скалярного сейсмического момента, радиуса очага и сброшенных напряжений от магнитуды, найдены коэффициенты корреляции динамических параметров и моментной магнитуды M_w. Для Центрального Тянь-Шаня

в целом было отмечено, что между магнитудой M и $\Delta \sigma$ наблюдается более слабая корреляция, чем между M и M_0 а также между M и r. Сейсмическая активность Северного Тянь-Шаня выше, чем в среднем для Центрального Тянь-Шаня. Значительный сброс напряжений характерен для областей с деформацией преобладания простого сжатия. В работе [Сычева, 2020] также показано, что, согласно распределению коэффициента Лоде-Надаи µ, большая часть исследуемой территории находится в условиях деформации с преобладанием простого сжатия $(\mu > 0.2)$, в северо-западной части выделяется область деформации с преобладанием простого растяжения ($\mu_{c} < -0.2$), для большей части впадин характерна деформация чистого сдвига $(-0.2 \le \mu_c \le 0.2).$

Анализ сброшенных напряжений и/или параметра $e_{\rm PR}$ для зоны БГП с высокой плотностью данных представляет интерес в связи с уже упомянутым вопросом о наличии или отсутствии усредненной зависимости Δσ от масштаба события. Для обоснования тесной физической взаимосвязи между сброшенными напряжениями и приведенной сейсмической энергией ниже приведено краткое изложение теоретических основ оценки динамических параметров очагов землетрясений. Считаем это целесообразным, поскольку оригинальные работы по методикам оценок ДП [Костров, 1975; Ризниченко, 1985; Boatwright, 1980] опубликованы довольно давно, а способы реализации таких методик в современных работах различаются, что затрудняет сравнение их результатов. Для иллюстрации пропорциональности между значениями $\Delta \sigma$ и $e_{\rm pR}$ рассматриваются примеры эмпирических определений приведенной сейсмической энергии в разных регионах Северной Евразии. Обобщение этих результатов указывает на наличие степенной (монотонно нарастающей) зависимости $e_{\rm pr}$ от сейсмического момента, т.е. от масштаба события. При попытке распространения этого вывода на сброшенные напряжения, $\Delta \sigma \sim e_{\rm pR}$, возникает расхождение с результатами об отсутствии зависимости $\Delta \sigma(M_0)$. Детальный анализ взаимосвязи сброшенных напряжений и других ДП в данной работе проводится на примере территории БГП в Северном Тянь-Шане, с использованием банка данных о динамических параметрах и спектральных характеристиках землетрясений, который содержит записи для 183 событий энергетических

классов K = 8.7 - 14.8 (M = 2.7-6.0), что составляет 53 % от общего числа событий того же диапазона классов, произошедших в тот же период. Этот банк данных не имеет аналогов по объему данных о ДП очагов на компактной территории, он позволяет применить статистические методы анализа для обоснования устойчивых корреляций $\Delta \sigma$ и M_0 , а также выявления других закономерностей, в частности взаимосвязи сброшенных напряжений с типом фокального механизма. На примере Северного Тянь Шаня показано, как можно нивелировать несоответствие результатов из различных литературных источников о характере зависимости $\Delta \sigma(M_0)$.

Теоретические основы оценок динамических параметров очагов, связь сброшенных напряжений с приведенной сейсмической энергией

Скалярный сейсмический момент определяется, согласно [Костров, 1975; Аки, Ричардс, 1983], как произведение модуля сдвига *G*, площади разрыва *S* и среднего по этой площади смещения *D*:

$$M_0 = G S D \tag{4}$$

По величине M_0 можно оценить магнитуду землетрясения M_W с помощью формулы Канамори (2). Для наглядного сопоставления скалярной величины M_0 и тензора сейсмического момента $(M_0)_{ij}$ [Костров, 1975; Кейлис-Борок и др., 1979; Аки, Ричардс, 1983] приводим выражение, связывающее компоненты этого тензора с вектором смещения по разрыву D_i и единичным вектором n_j (*i*, *j*=1, 2, 3), задающим ориентацию поверхности *S*:

$$(M_0)_{ij} = G S (D_i n_j + D_j n_i) /2$$
 (5)

Выражение (5) можно переписать в виде

$$(M_0)_{ij} = M_0 (d_i n_j + d_j n_i) / 2 = M_0 m_{ij}, \quad (6)$$

где $d_i = D_i/D$ – компоненты единичного вектора, направленного вдоль вектора смещения, а тензор m_{ij} представляет собой тензор механизма очага (направляющий тензор сейсмического момента), который может быть также выражен через направляющие векторы для осей растяжения t_i , i = 1,2,3 и сжатия p_j , j = 1,2,3 с помощью формулы $m_{ij} = (t_i t_j - p_j p_j)/2^{\frac{1}{2}}$. Как видно из (6), скалярный сейсмический момент

и наибольшая компонента тензора $(M_0)_{ij}$ имеют один и тот же порядок величины.

Для совокупности землетрясений, произошедших в объеме среды V за период времени T, вызванная ими усредненная неупругая деформация описывается тензором скорости разрывной (сейсмотектонической) деформации, $<\varepsilon_{ii}>$ [Юнга, 1990]:

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{GVT} \sum_{\alpha=1}^{N} M_0^{(\alpha)} m_{ij}^{(\alpha)}, \qquad (7)$$

где суммирование проводится по сейсмическим событиям, нумерованным с помощью индекса a, N – количество событий. В случае, когда период времени выражен в годах, тензор $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ также называют среднегодовым приростом сейсмотектонической деформации (СТД). В работах [Лукк, Юнга, 1979; Юнга, 1990] предложено аппроксимировать (7) следующим выражением:

$$<\varepsilon_{ij}>=\frac{1}{GVT}\sum M_0^{(\alpha)}\cdot\sum m_{ij}^{(\alpha)}=I_{\Sigma}\sum m_{ij}^{(\alpha)},\quad(8)$$

где введена скалярная характеристика прироста сейсмотектонической деформации I_{Σ} , называемая интенсивностью СТД.

Формулы (7), (8) указывают на возможность взаимосвязей между динамическими параметрами очагов (в частности, сейсмическим моментом M_0) и параметрами тензора прироста СТД. Анализ подобных взаимосвязей по сейсмическим данным для Северного и Центрального Тянь-Шаня входит в задачи данной работы.

Смещение D в выражении (4) описывает асимптотическое значение относительной подвижки «берегов» при $t \rightarrow \infty$ [Ризниченко, 1985; Boatwright, 1980; Scholz, 2002]. Согласно известным решениям волновых уравнений для сферически расходящихся сейсмоволн, D пропорционально низкочастотному пределу спектральной плотности смещения Ω₀, которое регистрируется в волновой зоне на удалении от разрыва [Аки, Ричардс, 1983]. Сейсмический момент также пропорционален Ω_0 (этот параметр далее для краткости будем называть спектральной плотностью, следуя терминологии [Scholz, 2002, 2019] и других работ. Стоит отметить, что M_0 считается наиболее адекватным показателем интенсивности («силы») землетрясения [Hanks, Kanamori, 1979], он не зависит от деталей развития процесса в очаге, в частности от описываемых параметром высокочастотной части спектра – угловой частотой f_0 (частотой среза).

Выражение для расчета сейсмического момента M_0 на основе спектральных параметров записывается в форме [Аки, Ричардс, 1983; Ризниченко, 1985; Boatwright, 1980]:

$$M_0 = 4 \pi \rho R V_s^3 \Omega_0 / \Psi_0, \qquad (9)$$

где R – расстояние от очага станции или до референтной точки, где определяется спектр, ρ – плотность пород в области очага, V_s – скорость поперечных волн, Ψ_0 – фактор направленности излучения из очага (для источника, описываемого скачком смещения на плоскости разрыва, среднее значение этого фактора принимается 0.64 [Ризниченко, 1985]). Фактор Ψ_0 мало чувствителен к модели разрыва в очаге, так что погрешность оценки M_0 по формуле (9) не превышает 10–15 % [Ruff, 1999; Scholz, 2002].

Величина сброшенных напряжений характеризует среднее различие между касательным напряжением в разломе до землетрясения (σ_0) и после него (σ_1) [Gibowicz, Kijko, 1994]. Этот параметр определяется по среднему смещению *D*, нормированному на характерный размер очага r_1 , с помощью следующего выражения [Костров, 1975; Кочарян, 2014; Brune, 1970, 1971; Ruff, 1999; Mori et al., 2003]:

$$\Delta \sigma = \sigma_0 - \sigma_1 = C_{\sigma} GD/r_1, \qquad (10)$$

где коэффициент $C_{\sigma} \sim 1$ при адекватном выборе характерного размера r_1 , который в случае некруглой формы очага может отличаться от упомянутого выше радиуса r.

Для площадки разрыва в форме круга радиусом *r* (площадь $S = \pi r^2$), характерный размер r_1 можно отождествить с радиусом *r*, и тогда выражение для сброшенных напряжений $\Delta \sigma$ примет форму $\Delta \sigma = C_{\sigma} M_0 / \pi r^3$. Значение коэффициента C_{σ} для случая разрыва-круга определено в работе [Eshelby, 1957]: $C_{\sigma} = 7\pi / 16 \approx 1.37$, и из (10) получается следующее выражение:

$$\Delta \sigma = 7M_0 / 16 r^3, \tag{11}$$

которое наиболее часто используется для оценки величины ∆о по сейсмическим данным [Brune, 1970, 1971; Scholz, 2002].

Радиус очага r в выражении (11) определяется формулой [Scholz, 2002; Abercrombie, Rice, 2005; Scuderi et al., 2016]:

$$r = k V_{\rm s} / f_0, \tag{12}$$

где k – численный коэффициент, зависящий от модели разрыва в очаге. Входящая в (12) угловая частота f_0 характеризуется теми свойствами, что при $f = f_0$ модельный спектр смещения S(f) [Scholz, 2002] проходит точку перегиба, а соответствующий спектр скорости имеет максимум. Подстановка (12) в (11) дает общее выражение для сброшенных напряжений через сейсмический момент и угловую частоту:

$$\Delta \sigma = (7/16k^3) M_0 f_0^3 / V_s^3, \tag{13}$$

которое будем далее использовать для сопоставления с зависимостью сейсмической энергии и приведенной сейсмической энергии от *f*₀.

Предварительно рассмотрим выбор моделей разрыва в очаге, определяющих значение коэффициента k в (12), который может существенно повлиять на погрешность расчета величины радиуса очага и, как следствие, сброшенных напряжений. Для определения динамических параметров очага по параметрам спектров чаще других используются две модели: ставшая почти классической модель Брюна [Brune, 1970, 1971] и модель Мадариаги [Madariaga, 1976, 1979].

При использовании простейшей модели Брюна [Brune, 1970] $k = k_{\rm B} = 0.37$ и выражения (11, 13) определяют так называемый радиус Брюна, $r = r_{\rm B}$. В этой модели очага считается, что смещение происходит одновременно и «мгновенно» по всей плоскости разрыва, которая имеет форму круга с радиусом *r*. Зона очага – сферическая, с тем же радиусом.

В современных работах [Boore, 2003; Abercrombie, Rice, 2005; Lancieri et al., 2012; Kaneko, Shearer, 2014; и др.] модель Брюна характеризуют как ad hoc, поскольку она не вытекает непосредственно из теоретических расчетов, но опирается на общефизические принципы (в силу которых правильно описывается и низкочастотный предел спектральной плотности смещения, и спад этой плотности смещения пропорционально 1/f² в области высоких частот). В этих и других работах аргументировано, что модель Брюна (выражение (12) с коэффициентом $k = k_{\rm B} = 0.37$) дает завышенное значение радиуса очага и оценка сброшенных напряжений Δσ, которая получается при подстановке этого значения k в (13), может оказаться заниженной в несколько раз [Abercrombie, Rice, 2005]. Тем не менее применение простейшей модели Брюна может быть оправдано, когда проводится сравнение

Геосистемы переходных зон 2020, 4 (4): 393–446

расчетов динамических параметров с предшествующими результатами для данного региона, полученными по записям сейсмограмм на аналоговых станциях.

В модели Мадариаги [Madariaga, 1976, 1979] в качестве очага рассматривается дисковая трещина, радиально растущая со скоростью $V_{\rm R} \sim (0.7-0.9)V_{\rm S}$ и останавливающаяся, когда ее радиус достигает максимального значения, называемого радиусом разрушения $r_{\rm M}$. Очаг считается цилиндрически симметричным. В этой модели угловая частота зависит не только от радиуса очага, сопоставляемого с $r_{\rm M}$, но и от скорости разрыва $V_{\rm R}$. В большинстве работ для оценок радиуса очага принимается, что $V_{\rm R} \approx 0.9 V_{\rm S}$ [Abercrombie, Rice, 2005; Kaneko, Shearer, 2014; и др.], и тогда коэффициент k в (12) для модели Мадариаги становится равен $k = k_{\rm M} = 0.21$. Если радиус очага в модели Брюна в 1.76 раз больше, чем в модели Мадариаги, то расхождение $\Delta \sigma$ в этих моделях, обратно пропорциональное кубу радиуса, оказывается пятикратным (а точнее, в 5.5 раза).

Расчеты, проведенные в работе [Капеко, Shearer, 2014] с учетом эффектов сцепления (cohesion), ограничивающих значение напряжения на фронте растущей трещины, позволили уточнить модель Мадариаги (круглой расширяющейся трещины) и показали, в частности, что при той же скорости разрушения $0.9V_{\rm s}$ коэффициент в формулах (12), (13) следует принять равным $k = k_{\rm KS} = 0.26$ (Kaneko, Shearer). Таким образом, радиус очага оценен на 24 % больше по сравнению с моделью Мадариаги, а сброшенное напряжение в 1.9 раз меньше, чем для этой модели, но в 2.9 раз больше, чем для модели Брюна.

Известны также и другие работы [Москвина, 1969 а, б; Sato, Hirasawa, 1973; Kwiatek, Ben-Zion, 2013], в которых предсказаны значения радиуса очага и сброшенных напряжений примерно в середине между этими параметрами в моделях Брюна и Мадариаги. В частности, в работе [Sato, Hirasawa, 1973] рассматривалась модель круговой трещины, аналогичная случаю Мадариаги, и установлено значение коэффициента $k = k_{sh} = 0.29$.

Опираясь на общефизический принцип соответствия результатов, можно подтвердить, что выражение (12) с коэффициентом по Канеко–Ширеру (k = 0.26) дает наиболее надежную оценку радиуса очага. В гидродинамике сплошных сред и физической акустике известна задача об излучении звука колеблющимся телом в жидкой среде [Ландау, Лившиц, 1988]. В спектре такого излучения угловая частота f_0 с высокой точностью соответствует «геометрическому» условию: половина длины волны $\lambda/2$ на данной частоте равна габаритному размеру (диаметру излучателя), т.е. $r = \lambda/4$. Переходя от жидкой среды к твердой земле, используя для интересующих нас поперечных волн соотношение $\lambda = V_s/f_0$, из этого условия легко получить выражение (12) с «общефизической» оценкой коэффициента $k_{\rm OF} = 0.25$.

Таким образом, усовершенствованная модель Мадариаги-Канеко-Ширера может считаться предпочтительной по отношению к другим моделям. Соответствующее этой модели значение $k_{\rm KS} = 0.26$ (весьма близкое к общефизической оценке) можно использовать как «эффективное», $k = k_{ef}$, для проведения массовых расчетов по формулам (12, 13). Отличие оценок сброса напряжений, получаемых для других моделей разрыва (Брюна, Мадариаги, Сато и др.), от результатов расчета $\Delta \sigma$ с использованием значения $k_{\rm ef} = 0.26$ не превышает 2.9 раз. По сути, это является возможной систематической погрешностью, которую уместно сравнить со случаями 2-3-кратных расхождений значений сейсмического момента в определениях разных авторов. Стоит отметить, что модель Брюна все еще продолжает применяться в работах недавнего времени [Ide et al., 2003; Oth et al., 2010; Baltay et al., 2011; Cotton et al., 2013; Pacor et al, 2016; Safonov et al., 2017]. Результаты расчетов радиуса очага и сброшенных напряжений по любой из моделей позволяют построить распределения этих величин по площади и во времени. Эти распределения, а также относительные значения r; $\Delta \sigma$ более информативны по сравнению с их абсолютными значениями.

Далее расчет значения радиуса очага и, соответственно, уровня сброшенных напряжений приводится для двух моделей: $k = k_{\rm B} = 0.37$ (модель Брюна); $k = k_{\rm ef} = 0.26$ (Мадариаги–Канеко–Ширера).

Сейсмическая энергия E_s , т.е. часть энергии деформирования, излученная в виде сейсмических колебаний, так же как и сейсмический момент, пропорциональна смещению D и площади разрыва S:

$$E_{\rm s} = \sigma_{\rm a} S D \tag{14}$$

Геосистемы переходных зон 2020, 4 (4): 393–446

В выражение (14) входит кажущееся напряжение σ_a (см. (3)), оно показывает, при каком касательном напряжении работа по подвижке на величину D численно равна E_s .

Сейсмическая энергия может быть оценена по спектральным параметрам Ω_0 и f_0 сейсмических волн в референтной точке на удалении от очага [Boatwright, 1980], причем вклад S-волн наиболее значим. Компактные выражения для E_s могут быть получены, если не учитывать направленность излучения из очага [Boatwright, 1980; Madariaga, 2011]. Приведем упрощенный вывод соотношения между E_s и угловой частотой f_0 , т.е. параметром спектра [Madariaga, 2011]. Поскольку плотность потока энергии в волне пропорциональна квадрату массовой скорости \dot{u}^2 :

$$w(R, t) = \rho V_{\rm s} \dot{u}^2(R, t),$$
 (15)

то в пренебрежении неоднородностью направленности излучения

$$E_{\rm s} = 4\pi R^2 \rho V_{\rm s} \int_0^\infty \dot{u}^2(R,t) dt =$$

= $4R^2 \rho V_{\rm s} (2\pi)^3 \int_0^\infty f^2 \cdot u_{\rm F}^2 df,$ (16)

где $u_{\rm F}$ – фурье-гармоника смещения, выраженная через обычную (не циклическую) частоту *f*. Подстановка в (16) частотной зависимости $u_{\rm F}$ согласно спектральной модели Брюна [Brune, 1970]: $u_{\rm F} = S(f) = \Omega_0 / (1 + f^2/f_c^2)$ дает после преобразований следующее выражение:

$$E_{\rm s} = 8\pi^4 R^2 \rho V_S \Omega_0^2 f_c^3.$$
 (17)

Как видно из (17), сейсмическая энергия сильно зависит от параметра f_c , описывающего поведение спектра в диапазоне высоких частот и имеющего тот же физический смысл, что и f_0 из (12), (13). Это отражает чувствительность E_s к скорости распространения разрыва в очаге [Hanks, Kanamori, 1979].

При объединении формул (9) и (17) можно получить удобное выражение, связывающее сейсмическую энергию, сейсмический момент и угловую частоту ($f_c \cong f_0$) [Madariaga, 2011]:

$$E_{\rm S} = \frac{1}{2} \pi^2 \Psi_0^2 M_0^2 f_0^3 / \rho V_{\rm S}^5 \approx 2M_0^2 f_0^3 / \rho V_{\rm S}^5.$$
(18)

Поскольку скорость *S*-волн есть не что иное как $(G/r)^{1/2}$, из выражения (18) следует, что приведенная сейсмическая энергия пропорциональна фактору $(f_0/V_s)^3$:

$$e_{\rm PR} = 2 \left(M_0/G \right) f_0^3 / V_{\rm S}^3.$$
 (19)

Так как отношение $V_{\rm S}/f_0$ характеризует радиус очага r [Brune, 1970, 1971], куб его значения пропорционален объему очага, и поэтому $e_{\rm PR}$ может быть выражена через объемную плотность сейсмического момента и модуль сдвига (параметр среды).

Из (19) видно, что приведенная сейсмическая энергия, как и $\Delta \sigma$ в (11), зависит только от объемной плотности сейсмического момента. Из выражений (13), (19) следует соотношение между $e_{\rm PR}$ и $\Delta \sigma$:

$$e_{\rm pR} = 32 \; k^3 \Delta \sigma \; / \; 7G \tag{20}$$

в котором коэффициент пропорциональности *k* определяется только выбором модели очага (Брюна, Мадариаги и др.) и не зависит от угловой частоты и динамических параметров. Поскольку параметры $\Delta \sigma$ и $e_{\rm pR}$ пропорциональны друг другу, по величине сброшенных напряжений можно оценивать $e_{\rm pR}$ и наоборот.

Оценки сброшенных напряжений и приведенной сейсмической энергии (обзор результатов)

Приведенная сейсмическая энергия $e_{\rm PR}$, как характеристика разрушения горных пород, удобна для сопоставления событий различного масштаба [Кочарян, 2016]. В предположении о выполнении условий подобия и одинаковой физике процессов в очаге, величина $e_{\rm PR}$ не должна зависеть от масштаба.

Скейлинг (зависимость от масштаба, модель) приведенной сейсмической энергии автоматически переносится на сброшенные напряжения, поскольку эти параметры пропорциональны друг другу. С учетом этого будем рассматривать результаты как по сброшенным напряжениям, так и по приведенной сейсмической энергии (или самой энергии E_s , с пересчетом на e_{pg}).

Обычно считается, что и сброшенные напряжения, и кажущиеся напряжения σ_a (14) должны быть примерно пропорциональны уровню напряжений, действующих на разломе. При этом кажется естественным, что увеличение уровня литостатических напряжений должно в среднем приводить к пропорциональному росту $\Delta \sigma$ и σ_a . Например, в работе [Раутиан, Халтурин, 1991] отмечен растущий тренд для кажущихся напряжений с увеличе-

Геосистемы переходных зон 2020, 4 (4): 393–446

нием глубины как для коровых, так и для глубинных землетрясений Памира. В то же время в других исследованиях [Choy, Boatwright, 1995; Родкин, 2001a; Choy et al., 2006] для ко-

ровых землетрясений не было обнаружено существенного увеличения $\Delta \sigma$ и σ_a с глубиной очага. Так, по данным [Родкин, 20016], кажущиеся напряжения в среднем возрастают в 1.5 раза при увеличении глубины очага с 10 до 50 км, т.е. росте литостатического напряжения более чем в 5 раз.

Судя по результатам лабораторных экспериментов [Кочарян и др., 2013], радикальное влияние на амплитуду скачка напряжений оказывает изменение, даже небольшое, характеристик материала-заполнителя разлома; при этом подобное изменение практически не сказывается на величине кулоновской прочности разлома.

Значительный разброс значений $\Delta \sigma$ (и, следовательно, $e_{\rm pR}$) является достаточно привычным результатом, который отмечался в разных работах [Gibowicz, Kijko, 1994; Tomic et al., 2009, Hua et al., 2013]. На рис. 1 а подобный разброс продемонстрирован при построении распределений угловой частоты в зависимости от M_0 в двойном логарифмическом масштабе, согласно [Hua et al., 2013]. При этом семейство прямых линий с заданным наклоном соответствует значениям $\Delta \sigma$. На рис. 1 б приведено аналогичное построение для данных, полученных в настоящей работе и из других источников.

При объяснении большого разброса значений Δσ чаще всего ограничиваются общими соображениями о неоднородности геофизической среды и разной прочности материала. В работах М.В. Родкина [Родкин, 2001 а, 6] рассмотрен ряд противоречий в традиционных моделях очага и отмечена неполнота подобных объяснений. В рамках флюидометамор-



Рис. 1. Угловая частота в зависимости от сейсмического момента: а – график из [Hua et al., 2013]. Пунктирные линии показывают сброшенные напряжения 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 и 100 МПа. Вертикальная пунктирная линия обозначает ограничение максимальной магнитуды для данных [Hua al., 2013]. Розовые кружки – данные наведенной сейсмичности, возникшей при заполнении водохранилища Longtan (около 1.5 тыс. событий на глубине от 4 до 10 км); другими символами обозначены данные из [Allmann, Shearer, 2009]; б – данные для регионов: БГП (Бишкекский геодинамический полигон) по [Сычева, Богомолов, 2016]; БГП (КИС, Кыргызский институт сейсмологии) – (Грин и др., 2002¹; Кальметьева и др., 2003²); Центральный Тянь-Шань – [Сычева, 2020]; БРЗ (Байкальская рифтовая зона) – [Добрынина, 2009]; Крым – [Пустовитенко и др., 2013]. Красными линиями отмечены границы согласно рис. 1 а.

¹ Пояснительная записка к акту выполненных работ за III, IV квартал 2001 г. и I квартал 2002 г. Авторы: Грин Т.П., Кальметьева З.А., Чеховская Р.А. Опытно-методическая сейсмологическая экспедиция НАН КР, 2002, 66 с.

² Пояснительная записка к акту выполненных работ по обработке и использованию данных KNET за III квартал 2002 г., I, III, IV квартал 2003 г. Авторы: Кальметьева З.А., Молдобекова С.К., Чеховская Р.А. Опытно-методическая сейсмологическая экспедиция НАН КР, 2003, 124 с.

фогенной модели сейсмогенеза им предложена альтернативная интерпретация различных результатов, отображенных на рис. 1 а.

Одним из факторов, который вносит вклад в разброс значений Δσ, гипотетически является специфика очагов техногенных сейсмических событий. В ряде работ ранее допускалось, что для таких очагов средний сброс напряжений ниже, чем для природных землетрясений [Fehler, Phillips, 1991; Abercrombie, Leary, 1993; McGarr, 1993; и др.]. Предположения опирались на статистику для большого количества сейсмических событий, по которой у техногенных землетрясений значения угловой частоты ниже по сравнению с обычными, тектоническими. Ниже, оказывается, и сброшенные напряжения при сопоставимых значениях M_0 , поскольку, согласно (13), $\Delta \sigma \sim M_0 f_0^3$. Это обобщение относится прежде всего к слабым сейсмическим событиям, для которых динамические параметры рассчитывались не по модели Брюна. Для сильных техногенных землетрясений (преимущественно с *M* > 4.5) при использовании модели Брюна различия в оценках f_0 становятся незначительными или вовсе не наблюдаются [Tomic et al., 2009; Hua et al., 2013]. Важно отметить, что для таких событий характерен чистый сдвиг, так же как и для природных тектонических землетрясений.

Для межплитных (*interplate*) землетрясений величина сброшенного напряжения в среднем примерно 3 МПа, а для внутриплитовых (*intraplate*) – примерно 10 МПа. Этому соответствуют значения приведенной сейсмической энергии, согласно (20): $e_{\rm PR} \sim 0.2 \cdot 10^{-4}$ для межплитных землетрясений и $e_{\rm PR} \sim 0.8 \cdot 10^{-4}$ для внутриплитных. По результатам расчетов, проведенных в [Сычева, 2020] и ниже в данной работе (см. таблицу в Приложении, далее П1), для внутриплитных землетрясений на территории БГП и Центрального Тянь-Шаня средняя величина сброшенного напряжения составляет 10.8 и 10.5 МПа, а медианное среднее $\Delta \sigma - 1.7$ и 3.5 МПа соответственно.

Перейдем к обзору результатов по приведенной сейсмической энергии, или излученной энергии E_s , которая легко пересчитывается на $e_{\rm PR}$. Обращают на себя внимание данные по E_s и $e_{\rm PR}$ для сейсмических событий вблизи горнодобывающих предприятий, где по технологии работ развернуты плотные сейсмологические сети. С этими данными естественно сравнивать результаты массовых определений $e_{\rm PR}$, $\Delta \sigma$ в Северном и Центральном Тянь-Шане (по данным сети KNET).

На рис. 2 а показаны примеры измерений сейсмической энергии и сейсмического момента, полученные на горнодобывающих предприятиях в Польше (шахта Рудна) и Финляндии (рудник Pyhäsalmi). В районе медной шахты Рудна исследовались события с моментными магнитудами от 1.4 до 3.5 [Domański, Gibowicz, 2008]. Динамические параметры были определены примерно для 600 событий, причем все их очаги имели механизм горизонтального сдвига. Из результатов [Domański, Gibowicz, 2008] следует, что зависимость приведенной сейсмической энергии от величины M_0 описывается моделью



Рис. 2. Зависимость излученной энергии E_s от величины сейсмического момента M_0 : а – для событий на шахте Рудна (1) и руднике Pyhäsalmi (2); б – для событий на шахте Strathcona месторождения Садбери (1) и в подземной обсерватории Манитоба, Канада (2). Здесь и далее символы – результаты измерений, линии – наилучшее приближение. Рисунок из [Беседина и др., 2015].

$$e_{\rm PR} = 3.8 \cdot 10^{-10} \, M_0^{0.28}, \tag{21}$$

которой соответствует сплошная линия на рис. 2 а (график 1). Соотношение (21) показывает, что величина $e_{\rm PR}$, как и пропорциональные ей сброшенные напряжения, увеличивается по мере роста сейсмического момента, т.е. условие подобия не выполняется.

На рис. 2 а (график 2) также приведены результаты измерений E_s и M_0 для слабых сейсмических событий, возможно вызванных горными работами, на руднике Pyhäsalmi [Oye et al., 2005]. Для рудника Pyhäsalmi, где глубина добычи достигает 1400 м (больше, чем в предыдущем примере), при довольно значительном уровне тектонических напряжений зависимость $e_{\rm PR}(M_0)$ допускает описание в форме

$$e_{\rm PR} = 3.6 \cdot 10^{-9} \, M_0^{0.28},\tag{22}$$

где степенная зависимость от сейсмического момента такая же, как в (21), но коэффициент на порядок больше.

В обсерватории Манитоба, Канада, регистрировались сейсмические события при буровзрывной проходке вертикального ствола диаметром 4.6 м в слаботрещиноватом граните на глубине около 400 м [Gibowicz et al., 1991]. После каждого взрыва в течение 2 ч количество событий быстро нарастало, после чего следовал экспоненциальный спад до фонового уровня. Из результатов [Gibowicz et al., 1991] следует, что модельное соотношение (регрессию, показанную на рис. 2 б, график 2) для приведенной сейсмической энергии можно записать в форме

$$e_{\rm pp} = 3.1 \cdot 10^{-7} \, M_0^{0.33}. \tag{23}$$

Для микросейсмических событий, связанных с проходкой в шахте Strathcona месторождения Садбери (Канада) на глубине около 700 м [Urbancic, Young, 1993], зависимость, построенная по результатам измерений $E_{\rm s}$ и M_0 , (рис. 2 б, график 1), эквивалентна следующей модели для $e_{\rm pp}$:

$$e_{\rm PR} = 1.24 \cdot 10^{-10} \, M_0^{0.7}. \tag{24}$$

Эта модель указывает на отклонение от закона подобия более существенное, чем в предыдущих примерах.

Для сейсмичности, наведенной заполнением водохранилища в Китае (1616 землетрясений в диапазоне магнитуд $M_{\rm L}$ 0.1–4.2 [Hua et al., 2013]), была установлена степенная зависимость $e_{\rm PR} \sim M_0^{0.63}$ с показателем степени близким к (24).

Для сейсмичности, инициированной массовыми взрывами на Таштагольском руднике, в работе [Маловичко А., Маловичко Д., 2010] получены две модельные зависимости (регрессии) $E_s(M_0)$ с показателями степени, существенно превышающими единицу (рис. 3 а). Измерения проводились в 2006 (график 1) и 2008 г. (график 2) в одном и том же месте до и после проведения серий взрывов с близкой массой заряда. Зависимости $e_{\rm PR}$ для двух графиков рис. 3 а описываются выражениями:

$$e_{\rm PR} = 4.6 \cdot 10^{-15} M_0^{0.97}, \quad e_{\rm PR} = 2.6 \cdot 10^{-11} M_0^{0.67}$$
(25)

Выражения (25) и рис. 3 а показывают, что у событий, произошедших в 2008 г., величи-



Рис. 3. Зависимость излученной энергии E_s от величины сейсмического момента M_0 : а – для событий на Таштагольском месторождения при измерениях 2006 (1) и 2008 (2) по данным [Маловичко А., Маловичко Д., 2010]; б – для событий на глубоких рудниках Южной Африки по данным 1 – [McGarr, 1994], 2 – [Yamada et al., 2007]; 3 – [Kwiatek et al., 2011]. Рисунок из [Кочарян, 2016].

на излученной энергии в среднем на порядок выше, чем у событий 2006 г., но показатель степени при M_0 во втором случае меньше, чем в первом.

На рис. 4 представлена оценка приведенной сейсмической энергии по данным о динамических параметрах очагов сейсмических событий на карьерах и шахтах г. Воркута [Беседина и др., 2015]. Величина $e_{\rm PR}$ лежит в диапазоне ~ 10^{-7} – 10^{-5} , а наилучшее степенное приближение можно записать в форме

$$e_{\rm PR} = 5.6 \cdot 10^{-7} \, M_0^{0.16}. \tag{26}$$

В обобщении [Кочарян, 2016] показано, что усреднение по всем опубликованным данным по излученной сейсмической энергии приводит к зависимости $E_s(M_0)$ весьма близкой к линейной. Соответствующая ей регрессия для приведенной сейсмической энергии описывается выражением

$$e_{\rm PR} = 2.3 \cdot 10^{-6} M_0^{0.04}, \qquad (27)$$

в котором близкое к нулю значение показателя степени может свидетельствовать о выполнении закона геометрического подобия [Кочарян и др., 2016]. Этот результат, в силу пропорциональности величины $e_{\rm PR}$ и сброшенных напряжений $\Delta \sigma$ (20), находится в соответствии с выводами [Baltay et al., 2011; Shaw et al., 2015] и других работ о статистической независимо-



Рис. 4. Зависимость приведенной сейсмической энергии от масштаба события в районе горнодобывающих предприятий Воркуты, линия – регрессия с коэффициентом детерминации R = 0.89, по [Беседина и др., 2015].

сти $\Delta \sigma$ от сейсмического момента либо магнитуды. Согласно [Кочарян и др., 2016], соотношения подобия выполняются наиболее точно для землетрясений среднего масштаба: в диапазоне $10^{15} < M_0 < 10^{20}$ Н·м (3.9 < $M_W < 7.3$). Для слабой сейсмичности, прежде всего техногенной, отмечен значительный разброс показателей степенной зависимости e_{pp} от сейсмического момента. Для рассмотренных выше примеров регрессионных зависимостей (21)-(27) диапазон изменений этих показателей от -0.2 до 0.97, что указывает на отклонение от самоподобия очагов землетрясений [Кочарян и др., 2016]. Чем выше показатель степени в зависимости $e_{PR}(M_0)$, тем сильнее выражено отличие от самоподобия.

Наличие нарастающей зависимости (регрессии) приведенной сейсмической энергии от M_0 можно подтвердить, используя результаты определения угловой частоты f_0 , полученные в работах (Грин и др., 2002³; Кальметьева и др., 2003⁴; [Добрынина, 2009; Пустовитенко и др., 2013; Сычева, Богомолов, 2016; Сычева, 2020]) (рис. 1 б). Для каждого события по данным о его угловой частоте и сейсмическом моменте можно вычислить величину $e_{\rm pr}$ с помощью выражения (19). На рис. 5 показаны результаты расчета приведенной сейсмической энергии землетрясений в тех же регионах, что представлены на рис 1 б (по данным из цитированных источников). На этом рисунке показаны также значения $e_{\rm PR}$ для событий в зоне вокруг Южных Курильских островов, определенные по значениям сейсмической энергии E_s и сейсмического момента М₀ из каталога ДП землетрясений северо-западной части Тихого океана за 1969–1996 гг. [Бурымская, 2001].

Согласно рис. 5, основной диапазон значений приведенной сейсмической энергии лежит от 10^{-6} до 10^{-3} , при значениях сейсмического момента M_0 от 10^{13} до 10^{18} Н·м. Величина $e_{\rm PR}$ меняется в наиболее широких пределах для Байкальской рифтовой зоны и Центрального Тянь-Шаня. Для Северного Тянь-Шаня (БГП) диапазон изменений $e_{\rm PR}$ более узкий, от $2 \cdot 10^{-6}$ до $3 \cdot 10^{-4}$. Рисунок 5 показывает, что во всех рассматриваемых регионах распределения значений $e_{\rm PR}$ в двойном логарифмическом масштабе допускают линейную регрессию (линейную зависимость $\lg e_{\rm PR}$ от $\lg M_0$). Такая

³ Пояснительная записка..., 2002

⁴ Пояснительная записка..., 2003


Рис. 5. Значения приведенной сейсмической энергии в зависимости от сейсмического момента для землетрясений в тех же регионах, что и на рис 1 б, а также для зоны Южных Курильских островов (по материалам [Бурымская, 2001; Богомолов и др., 2015]).

регрессия эквивалентна степенной зависимости $e_{\rm PR}(M_0)$. Форма зависимости приведенной сейсмической энергии от сейсмического момента для каждого из рассматриваемых регионов приведена в табл. 1.

Согласно табл. 1, показатели степени в выражениях, описывающих связь между $e_{\rm PR}$ и M_0 , варьируют от 0.39 до 0.81. Наиболее высокий

показатель, свидетельствующий об отклонении от самоподобия, отмечен для Байкальской рифтовой зоны, самый низкий – для Центрального Тянь-Шаня.

В завершение обсуждения результатов о приведенной сейсмической энергии стоит отметить, что в силу пропорциональности величин $e_{\rm PR}$ и $\Delta\sigma$ степенные регрессии для $e_{\rm PR}$ могут быть перенесены на сброшенные напряжения в тех же регионах. Возможные причины отклонения от закона подобия для сейсмичности, локализованной в тех или иных районах, подробно рассмотрены в [Кочарян, 2012], где отмечено, что для слабых событий главную роль играет зависимость упругих модулей горной породы от масштаба. Это объяснение, по всей видимости, можно отнести и к Северному и Центральному Тянь-Шаню.

Массовые оценки сброшенных напряжений и других динамических параметров очагов землетрясений в Северном Тянь-Шане

В данном разделе приводятся результаты исследования динамических параметров очагов 183 землетрясений (K = 8.7-14.8), произошедших в Северном Тянь-Шане (на террито-

Регион	Источник	Количество определений, N	$e_{_{\mathrm{PR}}}(M_{_0})$
БГП (по данным КИС)	[Грин и др., 2002 ⁵ ; Кальметьева и др., 2003 ⁶]	30	$3.3 \cdot 10^{-10} M_0^{0.39}$
Центральный Тянь-Шань	[Сычева, 2020]	150	$5 \cdot 10^{-12} M_0^{0.47}$
Байкальская рифтовая зона	[Добрынина, 2009]	62	$2.7 \cdot 10^{-17} M_0^{0.81}$
Южные Курилы	[Бурымская, 2001]	171	$1.6 \cdot 10^{-12} M_0^{0.43}$
Крым	[Пустовитенко и др., 2013]	58	$2.1 \cdot 10^{-12} M_0^{0.47}$
Шахта Рудна, Польша	[Domański, Gibowicz, 2008]	~ 600	$3.8 \cdot 10^{-10} M_0^{0.28}$
Рудник Pyhäsalmi, Финляндия	[Oye et al., 2005]	Не приведено	$3.6 \cdot 10^{-9} M_0^{0.28}$
Таштагольский рудник, горная Шория	[Маловичко А., Маловичко Д., 2010]	»	4.6·10 ⁻¹⁵ $M_0^{0.97}$ (2006 г.) 6·10 ⁻¹¹ $M_0^{0.67}$ (2008 г.)
Карьеры и шахты, г. Воркута	[Беседина и др., 2015]	»	$5.6 \cdot 10^{-7} M_0^{0.16}$
Провинция Юньнань, Китай	[Hua et al., 2013]	1616	$\sim M_0^{0.63}$

Таблица 1. Регрессионные зависимости приведенной сейсмической энергии от сейсмического момента для разных регионов и зон Северной Евразии и прилегающих территорий

⁵ Пояснительная записка..., 2002

⁶ Пояснительная записка..., 2003

рии БГП) в период 1998–2017 гг. На примере этого региона детально исследован вопрос о взаимосвязи сброшенных напряжений с величиной сейсмического момента, с типом фокального механизма и другими параметрами. Для рассматриваемых 183 событий построены очаговые спектры сейсмограмм и определены следующие динамические параметры: скалярный сейсмический момент М₀, радиус очага r, сброшенные касательные напряжения $\Delta \sigma$, сейсмическая энергия $E_{\rm s}$ и приведенная сейсмическая энергии $e_{\rm pR}$. Методика расчета ДП по параметрам очаговых спектров, адаптированная для сейсмограмм, регистрируемых сетью KNET [Сычева, 2016], подробно описана в предшествующих работах [Сычева, Богомолов, 2014, 2016]. Результаты расчетов ДП представлены в табл. П1 (см. Приложение). Для большинства рассматриваемых землетрясений (158 событий из 183) определен тип фокального механизма по знакам первых вступлений Р-волн (по той же методике, что в [Сычева и др., 2005]).

В табл. П1 (столбцы 9, 10) указаны значения спектральных параметров: угловой частоты f_0 и спектральной плотности Ω_0 , которые являются исходными для расчетов ДП. Для рассматриваемых событий (M = 2.7-6.0) Ω_0 меняется от 2.6·10⁻⁶ до 9.5·10⁻²м·с, а f_0 – от 1.7 до 6.0 Гц (что соответствует времени разрыва в очаге 0.6–0.17 с). Данные о Ω_0 и f_0 позволяют рассчитать значения динамических параметров землетрясений на территории Северного Тянь-Шаня. При расчете скалярного сейсмического момента M_0 , радиуса очага r, сброшенных напряжений Δσ, излученной сейсмической энергии E_s и приведенной сейсмической энергии e_{pp} по формулам (9), (11)–(13), (17), (18) значения плотности пород в очаге и скорости поперечных волн принимались равными $\rho = 2.6 \text{ г/см}^3$ [Чедия, 1986] и $V_{\rm s} = 3.5$ км/с [Roecker et al., 1993]. Результаты расчета этих динамических параметров приведены в табл. П1 в столбцах 11 - 17.

В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции между динамическими параметрами очагов землетрясений и их магнитудой, между скалярным сейсмическим моментом и другими ДП, а также некоторые регрессионные зависимости. Наибольший коэффициент корреляции между сейсмическим моментом M_0 и сейсмической энергией E_s (k = 0.98), наименьший – между M_0 и угловой частотой (k = 0.59).

Таблица 2. Регрессионные зависимости и коэффициенты корреляции динамических параметров очагов землетрясений с их магнитудой и сейсмическим моментом

Параметры	k	Модель
$e_{\rm PR} \leftrightarrow M_0$	0.74	$e_{\rm PR} = 6 \cdot 10^{-14} M_0^{0.59}$
$\Delta \sigma \leftrightarrow M_0$	0.74	$\Delta \sigma = 3.0 \cdot 10^{-8} M_0^{0.59}$
$f_0 \leftrightarrow \lg M_0$	0.85	$f_0 = -1.16 \log M_0 + 21.0$
$\lg\Omega_{_0} \leftrightarrow M$	0.89	$\log \Omega_0 = 1.11 \ M - 8.27$
$\lg M_{_0} \leftrightarrow M$	0.89	$\log M_0 = 1.11 M + 10.1$
$\lg E_{\rm S} \leftrightarrow \lg M_0$	0.98	$\lg E_{\rm s} = 1.59 \lg M_0 - 13.2$
$\lg e_{_{\mathrm{PR}}} \leftrightarrow \lg M_{_0}$	0.92	$\lg e_{\rm PR} = 0.59 \lg M_0 - 13.2$
$\lg e_{_{\mathrm{PR}}} \leftrightarrow M$	0.78	lg $e_{\rm PR} = 0.63 \ M_0 - 7.1$
$r_{_{\rm M}} \leftrightarrow {\rm lg}M_{_0}$	0.84	$r_{\rm M} = 81.0 \log M_0 - 926.4$

Примечание. Регрессионные зависимости для радиуса очага и сброшенных напряжений приведены для модели Мадариаги–Канеко–Ширера.

Рассмотрим особенности распределений параметров спектральных характеристик Ω_0 , f_0 и динамических параметров для 183 событий из табл. П1.

Спектральная плотность и скалярный сейсмический момент

Распределение параметра Ω_0 (в логарифмическом масштабе) в зависимости от магнитуды представлено на рис. 6 а, распределение скалярного сейсмического момента для тех же событий ($M_0 \sim \Omega_0$) – на рис. 6 б. Эти логарифмические распределения хорошо описываются моделью линейного нарастания. Для скалярного сейсмического момента регрессионную зависимость от магнитуды (наилучшую модель) можно записать в форме

$$\lg M_0 = 1.1 M + 10.1. \tag{28}$$

Коэффициент корреляции между значениями lg M_0 и магнитудой M составляет 0.89. Отклонение значений относительно линейной модели (линии регрессии на рис. 6 б) имеет равномерный характер на всем диапазоне рассматриваемых магнитуд.

Для рассматриваемых событий диапазон изменения магнитуды – $2.2 \le M \le 6.0$, а значения M_0 лежат в пределах от $6.2 \cdot 10^{12}$ до $2.2 \cdot 10^{17}$ Н·м. Стоит отметить, что из-за наличия разброса и сравнительно неширокого диапазона магнитуд распределение lg M_0 также согласуется (с точностью до 10 %) с известным выражением (1) [Ризниченко, 1985].



Рис. 6. Логарифмические распределения спектральной плотности (а) и скалярного сейсмического момента (б) в зависимости от магнитуды.

С учетом высокого значения коэффициента корреляции между магнитудой и значением логарифма сейсмического момента в дальнейшем в ряде случаев будем рассматривать распределения ДП в зависимости от $\lg M_0$.

Угловая частота и радиус очага

На рис. 7 показано распределение f_0 в зависимости от lg M_0 . Для угловой частоты характерно убывание с ростом lg M_0 или магнитуды (рис. 7а). По значениям угловой частоты определялся радиус очага с помощью формулы (12). В табл. П1 для удобства сравнения с другими работами приведены значения радиуса очага по модели Брюна, $r_{\rm B}$, с коэффициентом в (12), равным k = 0.37 (столбец 12), и для модели Мадариаги–Канеко–Ширера, $r_{\rm M}$, с k = 0.26 (столбец 14). Распределение значений

 $r_{\rm M}$ в зависимости от логарифма сейсмического момента представлено на рис. 7 б. Диапазон изменения радиуса $r_{\rm M}$ составляет примерно 150–450 м. Величина радиуса Брюна больше $r_{\rm M}$ в 1.42 раза, и значения $r_{\rm B}$ лежат в интервале приблизительно от 210 до 640 м.

Распределение радиусов очагов на рис. 7 б допускает линейную аппроксимацию по величине $\lg M_0: r_{\rm M} = 81 \cdot \lg M_0 - 926 = 98M - 135$. Отклонения значений $r_{\rm M}$ от линейной модели для событий с $\lg M_0 < 14.5$ оказались меньше, чем для событий с $\lg M_0 \ge 14.5$. Коэффициент корреляции между значениями $r_{\rm M}$ и $\lg M_0$ составляет около 0.84.

Сейсмическая энергия и приведенная сейсмическая энергия

Логарифмическое распределение сейсмической энергии $E_{\rm s}$ и приведенной сейсмической



Рис. 7. Значения угловой частоты (а) и радиуса очага (б) (по модели Мадариаги–Канеко–Ширера) в сопоставлении с lg M_0 .

энергии $e_{\rm PR}$ в сопоставлении со значениями lg M_0 представлено на рис. 8. Сейсмическая энергия варьирует в диапазоне от 1.0.107 до 7.6·10¹² Дж (см. табл. П1, столбец 16). Линейная модель, описывающая распределение E_s, имеет вид lg $E_{\rm s}$ = 1.59 lg M_0 – 13.2, а коэффициент корреляции между сейсмической энергией и скалярным моментом составляет k = 0.98(рис 8 а). Для рассматриваемых событий параметр $e_{\rm PR}$ имеет порядок от $0.2 \cdot 10^{-5}$ до ~ 10^{-3} (см табл. П1, столбец 17). Распределение lg $e_{\rm PR}$ также описывается линейной моделью (рис. 8 б), хотя для него разброс значений относительно линии регрессии больше по сравнению со случаем рис. 8 а. Выражение для линейной модели (регрессионной зависимости) имеет форму

$$\lg e_{\rm PR} = 0.59 \, \lg M_0 - 13.2 = 0.64 \, M - 7.1,$$

$$M_0 \, ({\rm H} \cdot {\rm M}), \tag{29}$$

причем коэффициент корреляции между значением lg $e_{\rm PR}$ и магнитудой составляет 0.78. Зависимость (29) можно записать также в степенной форме: $e_{\rm PR} = 7 \cdot 10^{-14} M_0^{0.59}$, указывающей показатель степени, который важен при сопоставлении ДП в различных регионах и в связи с вопросом о подобии очагов землетрясений.

Рис. 8 б показывает, что значения $e_{\rm PR}$ локализуются в полосе, границы которой параллельны аппроксимирующей прямой: внутрь таких полос попадает около 95 % значащих точек. Границы полосы локализации значений lg $e_{\rm PR}$ на рис 8 б определяются соотношением: 0.59 lg $M_0 - 13.6 \le \log e_{\rm PR} \le 0.59 \log M_0 - 12.9$.

Сброшенные напряжения и их аппроксимации (регрессии)

Значения сброшенных напряжений, определенных по модели Мадариаги–Канеко–Ширера, лежат в диапазоне от 0.6 до ~120 МПа (см. табл. П1), кроме одного землетрясения – Кочкорского, 25.12.2006, параметры которого $M_0 \sim 2 \cdot 10^{17}$ Н·м и $\Delta \sigma \sim 630$ МПа радикально отличаются от параметров других событий. При статистической обработке данных оно было исключено из расчетов.

Для модели Брюна, которая дает значения радиуса очага в 1.42 раза больше, чем модель Мадариаги–Канеко–Ширера, значения ∆о в соответствии с выражениями (11), (12) получаются в 2.9 раз меньше вышеприведенных. Распределение сброшенных напряжений вместе со значениями lg M_0 представлено на рис. 9 а. Наилучшей аппроксимацией распределения $\Delta \sigma$ является степенная зависимость от M_0 . Поясним это обстоятельство. Согласно выражениям (13), (19), (20), значения сброшенных напряжений и приведенной сейсмической энергии пропорциональны: $\Delta \sigma \sim e_{\rm pR}$. Следовательно, распределение lg $\Delta \sigma$ будет отличаться от распределения lg $e_{\rm pR}$ (рис. 8 б) лишь сдвигом по вертикали на некоторую константу. Для результатов расчетов Δσ (табл. П1) получена следующая аппроксимация: $\Delta \sigma = 3.0 \cdot 10^{-8} \cdot M_0^{0.59}$. Коэффициент корреляции между сброшенными напряжениями и сейсмическим моментом составляет k = 0.74 (табл. 2).

По рис. 9 а видно, что разброс значений $\Delta \sigma$ относительно линии регрессии увеличивается для событий с lg $M_0 > 14.5$ (магнитуды M > 4.0



Рис. 8. Распределение сейсмической (а) и приведенной сейсмической (б) энергии в зависимости от сейсмического момента в двойном логарифмическом масштабе.



Рис. 9. Распределение сброшенных напряжений (модель Мадариаги–Канеко–Ширера) для 182 событий из табл. П1 в сопоставлении со значениями lg M_0 (a) и результат кластеризации (б) значащих точек на графике $\Delta \sigma(M)$ по признаку $\Delta \sigma \ge 10$ МПа (красные точки) или $\Delta \sigma \le 10$ МПа (черные).

в соответствии с (28)). С учетом этого вопрос о корреляциях между $\Delta \sigma$ и lg M_0 анализировался более детально, для чего было сформировано несколько выборок событий (табл. 3), и для каждой из них определялись коэффициенты корреляции. Первые две выборки сделаны по значениям lg M_0 , характеризующего масштаб землетрясений: события из табл. П1 с lg $M_0 < 14.5$ составили первую выборку, а события с lg $M_0 \ge 14.5$ – вторую. Еще две выборки были сформированы по признаку сброшенных напряжений: в третью выборку вошли события с $\Delta \sigma < 10$ МПа, а в четвертую – $\Delta \sigma \ge 10$ МПа. Разграничение по признаку $\Delta \sigma$ с хорошей точностью соответствует выделению двух кластеров в распределении значащих точек на рис. 9 б с помощью алгоритма кластеризации GDBSCAN [Ling, 1972; Sander et al., 1998]. Распределение сброшенных напряжений для первых двух выборок представлено на рис. 10 а, последних – на рис. 10 б.

В табл. З приведены значения коэффициентов корреляции между сброшенным напряжением и логарифмом сейсмического момента для вышеописанных выборок, а также для генеральной выборки из 182. Для выборок с lg $M_0 \ge 14.5$ и с $\Delta \sigma \ge 10$ коэффициенты корреляций ниже, чем для генеральной выборки, и наблюдается значительный разброс значений относительно линии регрес-



Рис. 10. Распределение сброшенных напряжений в зависимости от логарифма скалярного момента: а – для событий с lg $M_0 < 14.5$ – черный, lg $M_0 \ge 14.5$ – малиновый цвет; б – для событий с $\Delta \sigma < 10$ – черный, для $\Delta \sigma \ge 10$ МПа – малиновый цвет.

Таблица 3. Регрессионные зависимости и коэффициенты корреляции между сброшенными напряжениями и сейсмическим моментом для различных выборок событий

Выборка для $\Delta \sigma$	k	Модель
Bce $\Delta \sigma$	0.74	$\Delta \sigma = 3 \cdot 10^{-8} M_0^{0.59}$
$\log M_0 < 14.5$	0.89	$\Delta \sigma = 4 \cdot 10^{-11} M_0^{0.8}$
$\lg M_0 \ge 14.5$	0.65	$\Delta \sigma = 6 \cdot 10^{-7} M_0^{0.50}$
$\Delta \sigma < 10 \text{ M} \Pi a$	0.57	$\Delta \sigma = 4 \cdot 10^{-8} M^{0.58}$
$\Delta \sigma \ge 10 \text{ M} \Pi a$	0.67	$\Delta \sigma = 8 \cdot 10^{-5} M_0^{0.37}$

сии. Высокий коэффициент корреляции для событий с lg $M_0 < 14.5$ отражается на графике тем, что точки значений $\Delta \sigma$ на рис. 10 а в большей степени локализованы вблизи линии регрессии, чем точки для другой выборки событий (малинового цвета). Для $\Delta \sigma < 10$ МПа коэффициент корреляции низкий, что объясняется малым изменением значений сброшенных напряжений для рассматриваемой выборки событий (черные точки на рис. 10 б).

Полученные регрессионные зависимости, в которых показатель степени у M_0 не менее 0.37, а также рис. 10 указывают на отсутствие самоподобия очагов землетрясений на территории БГП по сброшенным напряжениям и приведенной сейсмической энергии.

Сброшенные напряжения и фокальные механизмы

Для исследования данной зависимости значений из табл. П1 были выбраны события, при которых сброшенное напряжение составляло более 29 МПа (по модели Мадариаги-Канеко-Ширера, столбец 15 в табл. П1). Число таких событий – 20. Из той же таблицы были выбраны 20 событий с минимальным значением сброшенных напряжений. Напомним, что в таблице П1 в столбце 13 указаны значения Δσ по модели Брюна, которые рассматривались в предшествующих работах [Сычева, Богомолов, 2014, 2016]. На рис. 11 представлены эпицентральное положение и фокальные механизмы землетрясений из этих двух квантилей. Положение событий первой группы отмечено черным цветом, второй – серым, и их фокальные механизмы представлены в верхней и нижней части рисунка



Рис. 11. Эпицентральное расположение событий из двух выборок по Δσ и фокальные механизмы этих событий. Черные круги – события с Δσ > 29 МПа, серые – с минимальными значениями Δσ (по [Сычева, Богомолов, 2016]).

соответственно. Пространственное положение событий двух классов совпадает только частично. Основная часть событий первой выборки имеет чисто взбросовый (3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 17, 18, 19) или взбросо-сдвиговый механизм с минимальной сдвиговой составляющей (1, 2, 5, 6, 14, 20). Для второй выборки основную часть событий составляют взбрососдвиги или сдвиги, к чистым взбросам можно отнести 10, 11, 12, 15, 17, 18 события. Наблюдаемое распределение механизмов может демонстрировать наличие связи между характером подвижки и сбросом напряжений.

Для более детального анализа взаимосвязи сброшенных напряжений и типов фокального механизма по табл. П1 выделены выборки для наиболее распространенных типов очаговых подвижек: взбросов (ВЗ, 57 событий), взбросо-сдвигов (ВЗ-С, 38 событий) и горизонтальных сдвигов (СГ, 46 событий). Для взбросов значение медианного среднего Δσ составляет 4.9 МПа, для взбросо-сдвигов – 6.1 МПа, для горизонтальных сдвигов – 3.7 МПа. Для каждой выборки определены процентные доли событий с определенными значениями сброшенных напряжений. Информация о распределении числа событий трех наиболее распространенных типов фокальных механизмов (ВЗ, ВЗ-С, и СГ) представлена в табл. 4 и на рис. 12 с цветовыми маркерами как в табл. П1.

Из табл. 4 видно, что более 70 % событий сдвигового типа (СГ) приходится на диапазон сброшенных напряжений 1–9 МПа. Для взбросов и взбросо-сдвигов распределения более широкие, и при $\Delta \sigma > 9$ МПа для всех интервалов сброшенных напряжений абсолютное и относительное количество событий ВЗ-типа больше, чем СГ-типа.

Для статистического обоснования того, что среди событий со сброшенными напряжениями, превышающими величину 9-10 МПа, преобладают взбросы и взбросо-сдвиги, проведено несколько иное построение выборок. Поскольку среднее медианное $\Delta \sigma$ для всего каталога (табл. П1) равно 4.9 МПа, можно сформировать две выборки с равным числом событий с известными ДП и типом фокального механизма. Это выборка меньших сброшенных напряжений, $\Delta \sigma < 5$ МПа, и выборка событий с ∆ σ ≥ 5 МПа. Для каждой выборки определялась процентная доля взбросов, взбросо-сдвигов, сдвигов горизонтальных и сдвигов вертикальных (взрезы), а также сбросов и сбросо-сдвигов, т.е. всех реализованных типов очаговых подвижек по известной классификации [Юнга, 1990; Сычева и др., 2005]. Полученные результаты приведены в табл. 5.

Как видно из табл. 5, события-взбросы почти поровну распределились между выборками

Таблица 4. Распределение по интервалам сброшенных напряжений событий с разными типами фокальных механизмов на территории БГП (по данным табл. П1)

Интервал	B3	ВЗ-С	СГ
∆σ, ΜΠα	N (%)	N (%)	N (%)
0–1	-	-	1 (2.2)
1–3	15 (25.4)	9 (23.7)	16 (33.3)
3–9	21 (36.4)	14 (36.8)	18 (40)
9–27	11 (20)	11 (28.9)	8 (17.8)
27-81	9 (16.4)	3 (7.9)	2 (4.4)
> 81	1 (1.8)	1 (2.6)	1 (2.2)
Bce Δσ	57	38	46



Рис. 12. Гистограммы распределения числа землетрясений с различными типами фокальных механизмов по интервалам сброшенных напряжений. ВЗ – взброс, ВЗ-С – взбросо-сдвиг, СГ – сдвиг горизонтальный.

Вид подвижек	Генеральная выборка	$\Delta\sigma$ < 5 MIIa	$\Delta \sigma \ge 5 \ M \Pi a$
	N (%)	N (%)	N (%)
Сдвиги горизонтальные, СГ	46 (29.3)	30 (37.5)	16 (20.8)
Взбросо-сдвиги, ВЗ-С	38 (24.2)	16 (20)	22 (28.6)
Взбросы, ВЗ	57 (35.7)	28 (35)	28 (36.4)
Сбросы (СБ) и сбросо-сдвиги (СБ-С)	11 (7)	4 (5)	7 (9.1)
Сдвиги вертикальные, СВ	6 (3.8)	2 (2.5)	4 (5.2)
Все фокальные механизмы	158	80	77

Таблииа 5. Раст	ределение событий	і по типу d	окального механизма дл	я разных диапазонов $\Delta \sigma$	(по данн	ным табл. П1)
-----------------	-------------------	--------------------	------------------------	-------------------------------------	----------	--------------	---

меньших и больших $\Delta \sigma$. Для выборки событий с $\Delta \sigma \geq 5$ МПа доля взбросо-сдвигов больше, а доля СГ-событий меньше, чем в случае выборки с $\Delta \sigma < 5$ МПа. Поэтому при повышенных значениях сброшенных напряжений события с фокальными механизмами ВЗ и ВЗ-С типов преобладают, что видно и на рис. 12.

Сброшенные напряжения и интенсивность сейсмотектонической деформации

При проведении расчетов направленности и интенсивности сейсмотектонической деформации (СТД) исследуемая территория БГП была разделена на элементарные круговые зоны с радиусом 0.2°, с центрами в узловых точках специально выбранной сетки. Для расчета СТД в соответствии с (8) проводилось суммирование матриц индивидуальных механизмов *m*_{ii} в пределах каждой ячейки. Для той же ячейки определялась интенсивность СТД, I₅, непосредственным суммированием скалярных сейсмических моментов по формуле (8). Подробно методика расчета интенсивности СТД изложена в [Сычева и др., 2009]. Для сравнения распределений сброшенных напряжений и интенсивности СТД используем результаты из [Сычева, Мансуров, 2017].

Таблица 6. Диапазоны сброшенных напряжений для землетрясений на территории БГП (см. рис. 13)

Число событий	Δσ по модели Брюна	Δσ по модели МКШ
20	$\Delta \sigma \ge 10 \ M\Pi a$	$\Delta \sigma \ge 29 \ M\Pi a$
113	$1 \le \Delta \sigma < 10 \text{ M} \Pi a$	$2.9 \le \Delta \sigma < 29 \text{ MIIa}$
50	Δσ < 1 MΠa	Δσ < 2.9 MΠa

Распределение интенсивности СТД представлено на рис. 13. Максимум I_{Σ} составляет 0.18·10⁻⁹ год⁻¹. На эту же карту вынесено расположение эпицентров землетрясений из табл. П1 с цветовой маркировкой значений сброшенных напряжений (табл. 6).

Большая часть зеленых и красных значков событий попали в области, которые характеризуются интенсивностью деформации больше $0.1 \cdot 10^{-9}$ год⁻¹, – северные склоны восточной части Киргизского хребта, хр. Карамойнок и горы Сандык. «Синие» события малочисленны и располагаются в этих областях и вне их равномерно.

Отсутствие «красных» событий в зоне максимальной интенсивности (0.18 · 10⁻⁹ год⁻¹) можно попытаться объяснить с позиций триггерного влияния электромагнитных зондирований коры с применением мощного источника тока ЭРГУ-600 (электроразведочное генераторное устройство, расположенное на территории HC PAH) [Bogomolov et al., 2003; Сычев и др., 2010, 2012]. В цитируемых работах было отмечено уменьшение количества событий умеренной силы и возрастание слабой сейсмичности в окрестности расположения первичного диполя (см. малиновый квадрат на рис. 13). Велика вероятность, что в зоне максимальной интенсивности СТД сброс напряжений происходит за счет более слабой сейсмичности, и поэтому здесь нет условий для концентрации напряжений от поверхности до глубин 15 км. Вопрос о сейсмических проявлениях электромагнитных зондирований на территории БГП детально рассматривался в [Сычев и др., 2010, 2012; Богомолов, 2013], но в этих работах не использовались данные о сброшенных напряжениях в очагах.



Рис. 13. Поле интенсивности сейсмотектонической деформации (насыщенность цвета квадрата соответствует значению *I*_Σ в узловой точке согласно легенде) и расположение исследуемых землетрясений (обозначены кружками). Единица измерения – 10⁻⁹ в год⁻¹. Размер кружка зависит от энергетического класса события, цвет значка – от уровня Δσ (табл. 6). Квадраты: желтый – положение г. Бишкек, малиновый – положение Научной станции РАН. Красные линии – активные разломы (по [Ребецкий, Кузиков, 2016]).

Заключение

Для анализа весьма запутанного вопроса о наличии или отсутствии корреляций между сбросом напряжений в очагах землетрясений Северной Евразии и их энергетической характеристикой (сейсмическим моментом) использован банк данных о динамических параметрах очагов землетрясений с энергетическим классом K = 8.7-14.8, произошедших на территории Бишкекского геодинамического полигона за 1998-2017 гг. После пополнения решениями этот банк динамических параметров включает значения угловой частоты, параметра спектральной плотности, скалярного сейсмического момента, радиуса очага, уровня сброшенных напряжений, сейсмической энергии и приведенной сейсмической энергии для 183 событий, что сделало возможным применение статистических методов.

Для расчета радиуса очага использованы две модели – подход Брюна и улучшенная модель Мадариаги–Канеко–Ширера. По второй модели оценка радиуса очага согласуется с общефизическими оценками, основанными на положениях геоакустики. Уровень сброшенного напряжения в этой модели в 2.9 раз больше, чем в брюновской.

Для очагов землетрясений на территории БГП (Северный Тянь-Шань) установлена регрессия - степенная зависимость сброшенных напряжений от скалярного сейсмического момента с коэффициентом корреляции 0.74. Основной вклад в корреляцию дают сейсмические события с $M_0^- < 3.10^{14}$ H·м $(\lg M_0 < 14.5)$. Для более сильных землетрясений с lg $M_0 \ge 14.5$ коэффициент корреляции между значениями $\Delta \sigma$ и M_0 не более 2/3, и это позволяет понять результаты работ, в которых не было обнаружено значимых корреляций между сброшенным напряжением и сейсмическим моментом (в них не рассматривались относительно слабые события). Наличие нарастающей зависимости сброшенных напряжений и приведенной сейсмической энергии от сейсмического момента, установленное для БГП, согласуется с результатами о степенной зависимости $e_{\rm PR}(M_0)$ в ряде других регионов Северной Евразии.

Сопоставление сброшенных напряжений в очагах землетрясений на исследуемой территории и типов фокальных механизмов показало, что для событий одного класса, имеющих взбросовый механизм, средний уровень сброшенных напряжений выше, чем для событий того же класса с другими фокальными механизмами. На следующем этапе исследований сброшенных напряжений и приведенной сейсмической энергии представляется перспективным рассмотреть зависимости этих параметров от времени, сопоставить их вариации с изменением сейсмической активности и усредненной интенсивности сейсмотектонических деформаций. Другой решаемой задачей может стать оценка динамического сброса напряжений, т.е. зависимости $\Delta \sigma(t)$, в ходе сейсмической подвижки по плоскости разрыва.

В приложении к статье (после английской версии статьи) приведен каталог динамических параметров 183 землетрясений на территории Северного Тянь-Шаня (1998–2017 гг.). В нем представлены: дата, время события, координаты гипоцентра, глубина, энергетический класс, магнитуда, угловая частота, спектральная плотность, скалярный сейсмический момент, радиус очага, сброшенные напряжения, сейсмическая энергия, приведенная сейсмическая энергия и тип фокального механизма.

В электронной версии на сайте журнала (http://journal.imgg.ru/archive) каталог будет размещен в формате Excel.xlsx, позволяющем составлять рабочие выборки по любому критерию.

Список литературы

1. Аки К., Ричардс П. 1983. Количественная сейсмология. Теория и методы. Т. 1–2. М.: Мир, 880 с.

2. Беседина А.Н., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г. **2015.** Влияние деформационных характеристик нарушений сплошности породного массива на эффективность излучения очагов индуцированной сейсмичности. Ч. І. Результаты натурных наблюдений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ис*копаемых, 4: 83–95.

3. Богомолов Л.М., Сычева Н.А., Закупин А.С., Каменев П.А., Сычев В.Н. **2015**. Распределение спада напряжений в очагах землетрясений и проявления триггерных эффектов. В кн.: *Триггерные эффекты* в геосистемах (Москва, 16–19 июня 2015 г.): материалы Третьего Всероссийского семинара-совещания. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, с. 48–56.

4. Богомолов Л.М. **2013.** Поиск новых подходов к объяснению механизмов взаимосвязи сейсмичности и электромагнитных эффектов. *Вестник ДВО РАН*, 3: 12–18.

5. Бурымская Р.Н. **2001.** Спектральный состав излучения и очаговые параметры землетрясений северо-западной части Тихого океана за 1969–1996 годы. В кн.: Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана. А.И. Иващенко (отв. ред.). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, т. 1: 48–67.

6. Добрынина А.А. **2009.** Очаговые параметры землетрясений Байкальской рифтовой зоны. *Физика* Земли, 12: 60–75.

7. Кейлис-Борок В.И., Писаренко В.Ф., Соловьев С.Л. и др. **1979.** Массовое определение механизмов очагов землетрясений на ЭВМ. В кн.: *Теория и анализ сейсмологических наблюдений*. М.: Наука, 45–59. (Вычислительная сейсмология; вып. 12).

8. Костров Б.В. 1975. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 175 с.

9. Кочарян Г.Г. **2012.** Об излучательной эффективности землетрясений (пример геомеханической интерпретации результатов сейсмологических наблюдений). Динамические процессы в геосферах, 3: 36–47.

10. Кочарян Г.Г. **2014.** Масштабный эффект в сейсмотектонике. *Геодинамика и тектонофизика*, 5(2): 353–385.

11. Кочарян Г.Г. 2016. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 424 с.

12. Кочарян Г.Г., Марков В.К., Остапчук А.А., Павлов Д.В. **2013.** Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем. *Физическая мезомеханика*, 16(5): 5–15.

13. Кочарян Г.Г., Иванченко Г.Н., Кишкина С.Б. **2016.** Энергия, излучаемая сейсмическими событиями различного масштаба и генезиса. *Физика Земли*, 4: 141–156. doi:10.7868/S0002333716040037

14. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. **1988.** *Теоретическая физика*: учеб. пособие. Т. 6: Гидродинамика. 4-е изд. М.: Наука, 736 с.

15. Лукк А.А., Юнга С.Л. **1979.** Сейсмотектоническая деформация Гармского района. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 10: 24–43.

16. Маловичко А.А., Маловичко Д.А. **2010.** Оценка силовых и деформационных характеристик очагов сейсмических событий. В кн.: *Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов.* Новосибирск, т. 2, 66–92.

17. Москвина А.Г. **1969а.** Поле смещения упругих волн, создаваемое распространяющейся дислокацией. Изв. АН СССР. Физика Земли, 6: 3–10.

18. Москвина А.Г. **1969б.** Исследование полей смещения упругих волн в зависимости от характеристик очага землетрясения. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 9: 3–16.

19. Пустовитенко Б.Г., Мержей Е.А., Пустовитенко А.А. **2013.** Динамические параметры очагов землетрясений Крыма по сейсмическим станциям. *Геофизический журнал*, 5: 172–186.

20. Раутиан Т.Г., Халтурин В.И. **1991.** Очаговые спектры землетрясений. В кн.: Землетрясения и процессы их подготовки. М.: Наука, 82–93.

21. Ребецкий Ю.Л., Кузиков С.И. **2016.** Тектонофизическое районирование активных разломов Северного Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*, 57(6): 1225–1250.

22. Ризниченко Ю.В. 1985. Проблемы сейсмологии: Избранные труды. М.: Наука, 408 с.

23. Родкин М.В. **2001а.** Проблема физики очага землетрясения: противоречия и модели. *Физика Зем*ли, 8: 42–52.

24. Родкин М.В. **20016.** Статистика кажущихся напряжений и проблема природы очага землетрясений. *Физика Земли*, 8: 53–63.

25. Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Рыбин А.К., Сычева Н.А. **2010.** Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона. В кн.: *Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Третьего Всерос. семинара-совещ., Москва, 22–* 24 июня 2010 года. М.: ГЕОС, 316–326.

26. Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Сычева Н.А. **2012.** К вопросу о статистической достоверности сейсмического отклика при экспериментальных зондированиях коры Бишкекского геодинамического полигона. В кн.: Пятый Международный симпозиум, 19–24 июня, 2011 года. «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов»: материалы докл. Бишкек, т. 1: 273–280.

27. Сычева Н.А. **2016.** Киргизская сейсмологическая сеть KNET. Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета, 16 (5): 175–183.

28. Сычева Н.А. **2020.** Тензор сейсмического момента и динамические параметры землетрясений Центрального Тянь-Шаня. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 178–209. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.178-191.192-209

29. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. **2014.** Падение напряжения в очагах среднемагнитудных землетрясений в Северном Тянь-Шане. *Физика Земли*, 3: 142–153.

30. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. **2016.** Закономерности падения напряжений при землетрясениях Северного Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*, 57(11): 2071–2083. doi:10.15372/GiG20161109

31. Сычева Н.А., Мансуров А.Н. **2017**. Сравнение оценок деформаций земной коры Бишкекского геодинамического полигона на основе сейсмологических и GPS-данных. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(4): 809–825.

32. Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадеева В.А. **2005.** Сейсмотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET). *Физика Земли*, 11: 62–78.

33. Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Костюк А.Д. **2009.** Интенсивность сейсмотектонических деформаций как показатель динамических процессов в земной коре (на примере Тянь-Шаня). *Геофизические исследования*, 10(2): 37–46.

34. Чедия О.К. 1986. Морфоструктуры и новейший тектогенез Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 315 с.

35. Юнга С.Л. **1990.** *Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций*. М.: Наука, 191 с.

36. Abercrombie R.E., Leary P. **1993.** Source parameters of small earthquakes recorded at 2.5 km depth, Cajon Pass Southern California: implications for earthquake scaling. *Geophysical Research Letters*, 20(14): 1511–1514.

37. Abercrombie R.E., Rice J.R. **2005.** Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening? *Geophysical J. International*, 162: 406–424. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2005.02579.x

38. Allmann B.P., Shearer P.M. **2009.** Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 114, B01310. https://doi.org/10.1029/2008JB005821

39. Baltay A., Ide S., Prieto G., Beroza G. **2011.** Variability in earthquake stress drop and apparent stress. *Geophysical Research Letters*, 38(6). https://doi.org/10.1029/2011GL046698

40. Boatwright J. **1980.** Spectral theory for circular seismic sources: Simple estimates of source dimension dynamic stress drop and radiated energy. *Bull. of the Seismological Society of America*, 70: 1–28.

41. Bogomolov L.M., Avagimov A.A., Sycheva N.A., Bragin V.D. et al. **2003.** On the interrelation between week seismicity and sounding electric impacts at Bishkek geodynamic testing place. In: *Problems of destructure earthquake disaster prevention*. Almaty-Evero, p. 175–183.

42. Boore D.M. 2003. Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3): 635–676. https://doi.org/10.1007/pl00012553

43. Brune J.N. **1970.** Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 75(26): 4997–5009. https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997

44. Brune J.N. **1971.** Corrections. J. of Geophysical Research, 76(20): 5002.

https://doi.org/10.1029/jb076i020p05002

45. Candela T., Renard F., Bouchon M., Schmittbuhl J., Brodsky E.E. **2011.** Stress drop during earthquakes: effect of fault roughness scaling. *Bull. of the Seismological Society of America*, 101(5): 2369–2387. doi:10.1785/0120100298

46. Choy G.L., Boatwright J.L. **1995.** Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B9): 18205–18228. https://doi.org/10.1029/95jb01969

47. Choy G.L., McGarr A., Kirby S.H., Boatwright J. **2006.** An overview of the global variability in radiated energy and apparent stress. In: *Earthquakes: radiated energy and the physics of faulting*. AGU, p. 43–57. https://doi.org/10.1029/170gm06

48. Cotton F., Archuleta R., Causse M. **2013.** What is sigma of the stress drop? *Seismological Research Letters*, 84(1): 42–48. https://doi.org/10.1785/0220120087

49. Domański B., Gibowicz S. **2008.** Comparison of source parameters estimated in the frequency and time domains for seismic events at the Rudna copper mine, Poland. *Acta Geophysica*, 56: 324–343. doi:10.2478/s11600-008-0014-1

50. Eshelby J.D. **1957.** The determination of elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. *Proceedings of the Royal Society of London*, A241(1226): 376–396. https://doi.org/10.1098/rspa.1957.0133

51. Fehler M.C., Phillips W.S. **1991.** Simultaneous inversion for Q and source parameters of microearthquakes accompanying hydraulic fracturing in granitic rock. *Bull. of the Seismological Society of America*, 81(2): 553–575.

52. Gibowicz S.J., Kijko A. 1994. An introduction to mining seismolog. San Diego: Academic Press, 399 p.

53. Gibowicz S., Young R., Talebi S., Rawlence D. **1991.** Source parameters of seismic events at the Underground Research Laboratory in Manitoba, Canada: Scaling relations for events with moment magnitude smaller than 2. *Bull. of the Seismological Society of America*, 81: 1157–1182.

54. Hanks T., Kanamori H. **1979.** A moment magnitude scale. J. of Geophysical Research: Solid Earth, 84: 2348–2350.

55. Hua W., Chen Z., Zheng S. **2013.** Source parameters and scaling relations for reservoir induced seismicity in the Longtan reservoir area. *Pure and Applied Geophysics*, 170(5): 767–783.

56. Ide S., Beroza G.C., Prejean S.G., Ellsworth W.L. **2003.** Apparent break in earthquake scaling due to path and site effects on deep borehole recordings. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B5): 2271. doi:10.1029/2001JB001617

57. Kanamori H. **1977.** The Energy Release in Great Earthquakes. J. of Geophysical Research, 82(20): 2981–2987. https://doi.org/10.1029/jb082i020p02981

58. Kaneko Y, Shearer P.M. **2014.** Seismic source spectra and estimated stress drop derived from cohesivezone models of circular subshear rupture. *Geophysical J. International*, 197(2): 1002–1015. https://doi.org/10.1093/gji/ggu030

59. Kwiatek G., Ben-Zion Y. **2013.** Assessment of P and S wave energy radiated from very small sheartensile seismic events in a deep South African mine. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(7): 3630–3641. https://doi.org/10.1002/jgrb.50274

60. Kwiatek G., Plenkers K., Dresen G. et al. **2011.** Source parameters of picoseismicity recorded at mponeng deep gold mine, South Africa: implications for scaling relations. *Bull. of the Seismological Society of America*, 101(6): 2592–2608. https://doi.org/10.1785/0120110094

61. Lancieri M., Madariaga R., Bonilla F. **2012.** Spectral scaling of the aftershocks of the Tocopilla 2007 earthquake in northern Chile. *Geophysical J. International*, 189: 469–480. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05327.x

62. Ling R.F. **1972.** On the theory and construction of k-clusters. *The Computer J.*, 15(4): 326–332. doi:10.1093/comjnl/15.4.326

63. Madariaga R. 1976. Dynamics of an expanding circular fault. Bull. of the Seismological Society of America, 66: 639–666.

64. Madariaga R. **1979.** On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity. *J. of Geophysical Research*, 84: 2243–2250. https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02243

65. Madariaga R. 2011. Earthquake scaling laws. In: R.A. Meyers, ed. *Extreme environmental events: Complexity in forecasting and early warning*. Springer, p. 364–383. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6_22

66. McGarr A. **1993.** Factors influencing the strong ground motion from mining-induced tremors. In: R.P. Young, ed. *Rockbursts and seismicity in mines*. Rotterdam, p. 3–12.

67. McGarr A. **1994.** Some comparisons between mining-induced and laboratory earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 142: 467–489.

68. Mori J., Abercrombie R.E., Kanamori H. **2003.** Stress drops and radiated energies of aftershocks of the 1994 Northridge, California, earthquake. *J. of Geophysical Research*, 108(B11): 2545–2556. https://doi.org/10.1029/2001jb000474

69. Oth A., Parolai S., Bindi D., Wenz F. **2009.** Source spectra and site response from S-waves of intermediatedepth Vrancea, Romania, earthquakes. *Bull. of the Seismological Society of America*, 99(1): 235–254. https://doi.org/10.1785/0120080059

70. Oye V., Bungum H., Roth M. **2005.** Source parameters and scaling relations for mining-related seismicity within the Pyhäsalmi Ore Mine, Finland. *Bull. of the Seismological Society of America*, 95(3): 1011–1026. http://dx.doi.org/10.1785/0120040170

71. Pacor F., Spallarossa D., Oth A., Luzi L., Puglia R., Cantore L., Mercuri A., D'Amico M., Bindi D. **2016.** Spectral models for ground motion prediction in the L'Aquila region (central Italy): evidence for stress-drop dependence on magnitude and depth. *Geophysical J. International*, 204(2): 697–718. https://doi.org/10.1093/gji/ggv448

72. Parolai S., Bindi D., Durukal E., Grosser H., Milkereit C. **2007.** Source parameters and seismic moment-magnitude scaling for Northwestern Turkey. *Bull. of the Seismological Society of America*, 97(2): 655–660. https://doi.org/10.1785/0120060180

73. Roecker S.W., Sabitova T.M., Vinnik L.P., Burmakov Y.A., Golvanov M.I., Mamatkanova R., Munirova L. **1993.** Three-dimensional elastic wave velocity structure of the Western and Central Tien-Shan. *J. of Geophysical Research*, 98(B9): 15779–15795. https://doi.org/10.1029/93jb01560

74. Ruff L.J. **1999.** Dynamic stress drop of recent earthquakes: Variations within subduction zones. *Pure and Applied Geophysics*, 154: 409–431. https://doi.org/10.1007/s000240050237

75. Safonov D.A., Nagornykh T.V., Konovalov A.V., Stepnov A.A. **2017.** The moment tensors, focal mechanisms, and stresses on Sakhalin Island. *J. of Volcanology and Seismology*, 11(3): 225–234. https://doi.org/10.1134/S0742046317030058

76. Sander J., Ester M., Kriegel H., Xu X. **1998.** Density-Based clustering in spatial databases: The Algorithm GDBSCAN and its applications. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2): 169–194. doi:10.1023/A:1009745219419

77. Sato T., Hirasawa T. **1973.** Body wave spectra from propagating shear cracks. *J. of Physics of the Earth*, 21: 415–431. https://doi.org/10.4294/jpe1952.21.415

78. Shaw B.E., Richards-Dinger K., Dieterich J.H. **2015.** Deterministic model of earthquake clustering shows reduced stress drops for nearby aftershocks. *Geophysical Research Letters*, 42: 9231–9238. https://doi.org/10.1002/2015gl066082

79. Scholz C.H. **2002.** *The mechanics of earthquakes and faulting.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 496 p. https://doi.org/10.1017/cbo9780511818516

80. Scholz C.H. **2019.** *The mechanics of earthquakes and faulting*. 3rded. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 519 p. https://doi.org/10.1017/9781316681473

81. Scuderi M.M., Marone C., Tinti E., Di Stefano G., Collettini C. **2016.** Precursory changes in seismic velocity for the spectrum of earthquake failure modes. *Nature Geoscience*, 9(9): 695–700. https://doi.org/10.1038/ngeo2775

82. Tomic J., Abercrombie R.E., Do Nascimento A.F. **2009.** Source parameters and rupture velocity of small $M \le 2.1$ reservoir induced earthquakes. *Geophysical J. International*, 179: 1013–1023. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2009.04233.x

83. Urbancic T.I., Young R.P. **1993.** Space-time variations in source parameters of mining-induced seismic events with M < 0. *Bull. of the Seismological Society of America*, 83: 378–397.

84. Yamada T., Mori J.J., Ide S., Abercrombie R.E., Kawakata H., Nakatani M., Iio Y., Ogasawara H. **2007.** Stress drops and radiated seismic energies of microearthquakes in a South African gold mine. *J. Geophysical Research*, 112, B03305. doi:10.1029/2006JB004553

Об авторах

СЫЧЕВА Найля Абдулловна (ORCID 0000-0003-0386-3752), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории GPS, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Киргизия, nelya@gdirc.ru

БОГОМОЛОВ Леонид Михайлович (ORCID 0000-0002-9124-9797), доктор физико-математических наук, директор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0) Геофизика, сейсмология

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

TRANSLATION

UDK 550.34.094

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446

On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy

Nailia A. Sycheva¹, Leonid M. Bogomolov^{*2}

¹Research Station RAS in Bishkek city, Kyrgyzstan ²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: bleom@mail.ru

Abstract. A generalization of the results on the stress drop and the specific seismic energy for the earthquakes in Northern Eurasia has been made. The relationship of these parameters with the seismic moment and the magnitude has been analyzed. Detailed studies for the Northern Tien Shan (Bishkek geodynamic polygon) were carried out, the values of the dynamic parameters of the sources for 183 earthquakes of various energy classes (K = 8.7-14.8) were obtained: angular frequency, spectral density parameter, scalar seismic moment, source radius, stress drop level, seismic energy and specific seismic energy. Two models have been used to compute the source radius and the stress drop – the Brune approach and the improved Madariaga–Kaneko–Shearer model. For relatively weak events, a power-law dependence (regression) of the stress drop on the scalar seismic moment M_0 has been identified, that complies with the results on the power-law dependence of the specific seismic energy on M_0 in a number of other regions of Northern Eurasia. The relationship between the type of source movement and the stress drop level has been noted as well.

Keywords: earthquake source, magnitude, seismic moment, stress drop, specific seismic energy, scaling dependence

For citation: Sycheva N.A., Bogomolov L.M. On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 393–446. (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446

Для цитирования: Сычева Н.А., Богомолов Л.М. О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 4, с. 393–446. (На рус. и англ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446

Acknowledgements

Authors are grateful to Yury Rebetskii for discussion and valuable advices as the work progressed.

Introduction

The dynamic parameters (DP) of the earthquake sources such as the scalar seismic moment M0, emitted seismic energy E_s , source radius r (Brune radius), and shear stress drop (stress drop, $\Delta\sigma$) can characterize the regional features of the geostraining process. Establishment of modern seismic networks and the development of seismogram processing methods made it possible to currently determine the DP even for weak earthquakes [Dobrynina, 2009; Pustovitenko, 2013; Parolai et al., 2007; etc.]. For some regions, in particular the Northern Tien Shan, the involvement of the sources of weak earthquakes in the computation of dynamic parameters allowed to "accumulate statistical data" on the events with determined values of DP, to reveal their correlation properties and stable DP distributions [Sycheva, Bogomolov, 2016; Baltay et al., 2011]. When forming the databanks by dynamic parameters with more than 100 records (which is only several times less than the total number of events in the same magnitude range), we can talk about a massive determination of DP [Sycheva, Bogomolov, 2016].

A large number of works are devoted to the relations of the source dynamic parameters in different regions, in particular, to the search for correlations between the values of the source radius r, moment M_0 and magnitude M [Kocharyan, 2014; Abercrombie, Leary, 1993; Allmann, Shearer,

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Богомолов Л.М., Сычева Н.А. О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии. *Translation by G.S. Kachesova*.

2009; Baltay et al., 2011; Shaw et al., 2015; Pacor et al., 2016]. The regressions have been identified for several seismically active regions. Usually they have a form of linear dependence on a logarithmic scale (for example, see the review [Kocharyan, 2014]).

The best known average regression between M and M_0 (N·m) is as follows [Riznichenko, 1985]:

$$\log M_0 = 1.6M + 8.4, \tag{1}$$

and the regression between M and the moment magnitude $M_{\rm W}$, which is close numerically close to expression (1):

$$\log M_0 = 1.5M_w + 9.1$$
, where M_0 (N · m). (2)

It was shown in a recent work [Sycheva, 2020], by the example of the Bishkek geodynamic polygon (BGP), Northern Tien Shan, that the correlations of this type were shown to be are also valid for the magnitude range $M \ge 2.7$ (with a confidence error of up to 10 %).

The correlation between the values of the source radius and the magnitude of the event, as well as between the stress drop and the magnitude, is studied to a lesser extent. For the case of the stress drop, even the very existence of such a correlation itself is not obvious due to the broad scatter of values of $\Delta \sigma$ for the events with similar magnitudes. In a number of works based on the recent data [Baltay et al., 2011; Shaw et al., 2015; et al.], no significant relationship was found between the stress drop and the seismic moment (and, as a result, with the earthquake magnitude). The results of other works confirmed such a relationship, but provided various trends in $\Delta\sigma$ changes (increasing or decreasing) with an increase of M_0 or M_w . The result obtained in [Pacor et al., 2016] for the seismically active region of Abruzzo (Abruzzo, Central Italy), including the epicentral zone of the catastrophic L'Aquila earthquake on April 6, 2009, $M_{\rm W} = 6.1$ may serve as an example of the "intuitively" expected incremental trend in $\Delta\sigma(M_0)$. However, in the work [Candela et al., 2011] based on the analysis of fault zones in the French Alps and Nevada, USA, it is reasoned that, at least in these regions, the averaged dependence $\Delta\sigma(M_0)$ is weakly decreasing ($\Delta\sigma \sim M_0^{-0.15}$), not growing. Thus, even the character of the $\Delta\sigma(M_0)$ dependence has not yet been unambiguously determined.

In numerous works devoted to the problem of self-similarity of seismic sources (see, for example, [Kocharyan, 2014] for a bibliography), attention was focused on the scaling dependence of the specific seismic energy, $e_{\rm PR}$, which represents the ratio of the emitted seismic energy $E_{\rm S}$ to the seismic moment M_0 :

$$e_{\rm PR} = E_{\rm S} / M_0 = \sigma_{\rm a} / G \tag{3}$$

where G – shear modulus, σ_a – so-called apparent stress, which meaning is explained below.

The dependence of $e_{\rm PR}$ on M_0 was shown [Kocharyan, 2016] to be weakly increasing and well described by the $(M_0)^{\alpha}$, $0 < \alpha < 1$ power function. However, the relationship between $e_{\rm PR}$ and $\Delta \sigma$ parameters was practically not analyzed. It will be shown below in this work that the values of the stress drop and the specific seismic energy are proportional to each other, i.e. there is a physical relationship between these values. It allows using the data on the dependence of $e_{\rm PR}$ on the seismic moment to analyze the aspect of the averaged dependence (trend) $\Delta \sigma(M_0)$.

The presence of an increasing power-law dependence of the stress drop on the seismic moment was also confirmed when analyzing the dynamic parameters of the source earthquake [Sycheva, Bogomolov, 2016] occurred in the Northern Tien Shan within the area of 41–43° N and 73–77° E, called the Bishkek geodynamic polygon (test site).

This work is a continuation and detailing of the study [Sycheva, 2020], which considered the earthquake dynamic parameters in a wider area called the Central Tien Shan. It should be noted that the classification of the Central, Western, and Eastern Tien Shan is carried out in terms of longitude, and there is no any contradiction in assigning the territory of the BGP (part of the Northern Tien Shan) to the Central Tien Shan. In [Sycheva, 2020], the dynamic parameters were computed for 150 earthquakes in the Central Tien Shan; the regressions for the scalar seismic moment, the source radius, and the stress drop on the magnitude were constructed, the correlation coefficients of the dynamic parameters and the moment magnitude $M_{\rm w}$ were found. It was noted for the Central Tien Shan as a whole that a correlation between the magnitude M and $\Delta \sigma$ is weaker than correlation between M and M_0 , as well as between M and r. The averaged seismic activity of the Northern Tien Shan is higher than that of the Central Tien Shan. The significant stress drop is typical to the areas with a predominance of deformation of simple compression. It is also shown in [Sycheva, 2020] that, according to the distribution of the Lode-Nadai factor μ_{e} , most of the studied area is under deformation conditions with a predominance of simple compression ($\mu_{e} > 0.2$), a deformation area with a predominance of simple tension ($\mu_{e} < -0.2$) is distinguished in the northwestern part, most of the depressions are characterized with a pure shift deformation ($-0.2 \le \mu_{e} \le 0.2$).

The analysis of the stress drop and/or the $e_{_{\rm PR}}$ parameter for the BGP zone with a high data density is of interest due to the already mentioned aspect of the presence or absence of the averaged dependence of $\Delta \sigma$ on the event energy scale. A brief summary of the theoretical foundations for assessing the dynamic parameters of earthquake sources is given below to substantiate the close physical association between the stress drop and specific seismic energy. We consider this to be reasonable, since the original works on the methods of the DP estimation [Kostrov, 1975; Riznichenko, 1985; Boatwright, 1980] were published a long time ago. Moreover, the methods for the implementation of such techniques in modern works differ, so the comparison of their results is complicated. To demonstrate the proportionality between the values of $\Delta \sigma$ and $e_{\rm PR}$, the examples of empirical determinations of the specific seismic energy in different regions of Northern Eurasia are considered. Generalization of these results indicates the presence of a power-law (monotonically increasing) dependence of $e_{\rm PR}$ on the seismic moment, i.e. on the energy scale of the event. However, a discrepancy with the results on the absence of the $\Delta\sigma$ (M₀) dependence appears, when trying to extend this conclusion to the stress drop, $\Delta \sigma \sim e_{\rm PR}$. A detailed analysis of the relationship between the stress drop and other DP is carried out in this work on the example of the BGP territory in the Northern Tien Shan. The databank of the dynamic parameters and spectral characteristics of the earthquakes is used for the analysis, which contains the records for 183 events of K = 8.7-14.8(M = 2.7-6.0) energy classes, amounting near 53 % of the total number of events in the same class range that occurred in the same period. This databank has no analogue in terms of the data volume on DP of the sources in a compact territory; it allows to apply the statistical methods of analysis to substantiate stable correlations of $\Delta \sigma$ and M_0 , as well as to reveal other regularities, in particular, the relationship between the stress drop and the type of focal mechanism. It is shown on the example of the Northern Tien Shan how to mitigate the discrepancy between the results from various bibliographic sources about the kind of the $\Delta \sigma$ (M_o) dependence.

Theoretical bases for estimates of the source dynamic parameters, relationship between the stress drop and the specific seismic energy

The scalar seismic moment is defined as the product of the shear modulus *G*, the rupture area *S*, and the average displacement over this area *D*:

$$M_0 = G S D \tag{4}$$

The magnitude of the earthquake M_W can be estimated by the value of M_0 using the Kanamori formula (2). For a clear comparison of the scalar value M_0 and the seismic moment tensor $(M_0)_{ij}$ [Kostrov, 1975; Keylis-Borok et al., 1979; Aki, Richards, 1983], we give an expression connecting the components of this tensor with the displacement vector D_i and the unit vector n_i (i, j = 1, 2, 3), which specifies the orientation of the surface S:

$$(M_0)_{ii} = G S (D_i n_i + D_j n_i) /2$$
 (5)

Expression (5) can be rewritten as:

$$(M_0)_{ij} = M_0 (\mathbf{d}_i n_j + d_j n_i) / 2 = M_0 m_{ij}, \quad (6)$$

where $d_i = D_i/D$ is a component of the unit vector, oriented along the displacement vector, and the tensor m_{ij} is a tensor of source focal mechanism (seismic moment directional tensor), which could be also expressed via directional vectors for the tension axes t_i , i = 1,2,3 and compression axes p_j , j = 1,2,3 using the formula $m_{ij} = (t_i t_j - p_j p_j) / 2^{\frac{1}{2}}$. As seen from (6), the scalar seismic moment and the maximal tensor component $(M_0)_{ij}$ have the same order of magnitude.

For a set of earthquakes occurred in the volume of the medium V over a period of time T, the averaged inelastic deformation caused by them is described by the tensor of rate of seismotectonic (fractural) deformation, $\langle \varepsilon_{ii} \rangle$ [Yunga, 1990]:

$$<\varepsilon_{ij}>=\frac{1}{GVT}\sum_{\alpha=1}^{N}M_{0}^{(\alpha)}m_{ij}^{(\alpha)},\qquad(7)$$

where the summation is performed over seismic events numbered using the index a, N is the number of events. In the case when the time period is expressed in years, the tensor $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ is also called the average annual increment of seismotectonic deformation (STD). In the works [Lukk, Yunga, 1979; Yunga, 1990], it was proposed to approximate (7) with the following expression:

$$<\varepsilon_{ij}>=\frac{1}{GVT}\sum M_0^{(\alpha)}\cdot\sum m_{ij}^{(\alpha)}=I_{\Sigma}\sum m_{ij}^{(\alpha)},\ (8)$$

where the scalar characteristic of the seismotectonic deformation increment I_{Σ} , called the STD intensity, is introduced.

Formulas (7) and (8) indicate the possibility of relationship between the dynamic parameters of the sources (in particular, the seismic moment M_0) and the parameters of the tensor of STD increment. The targets of this work involve the analysis of such relationships, with the use of the seismic data for the Northern and Central Tien Shan.

The displacement D in expression (4) describes the asymptotic value of the relative movement of the break sides at $t \to \infty$ [Riznichenko, 1985; Boatwright, 1980; Scholz, 2002]. According to the known solutions of the wave equations for spherically diverging seismic waves, D is proportional to the low-frequency limit of the spectral displacement density Ω_0 , which is registered in the wave zone, remote from the break [Aki, Richards, 1983]. The seismic moment is also proportional to Ω_0 (hereinafter, we will call this parameter the spectral density for brevity, following the terminology of [Scholz, 2002, 2019] and other works). It should be noted that M_0 is considered the most adequate indicator of an earthquake intensity ("strength" of the event) [Hanks, Kanamori, 1979], it does not depend on the details of the process development in the source, in particular, on those described by the parameter of the highfrequency part of spectral density – the angular frequency f_0 (cutoff frequency).

The expression for computation of the seismic moment M_0 on the basis of spectral parameters is written as [Aki, Richards, 1983; Riznichenko, 1985; Boatwright, 1980]:

$$M_{0} = 4\pi \rho R V_{\rm s}^{3} \Omega_{0} / \Psi_{0}, \qquad (9)$$

where *R* is a distance from the source to a station or to a reference point, where the spectrum is determined, ρ – rocks density in the source area, V_s – shear waves velocity, Ψ_0 – factor of radiation directivity from the source (its averaged value is taken as 0.64 for the source, described as a jumping offset on the nodal plane [Riznichenko, 1985]). The factor Ψ_0 is insensitive to the break model in a source, therefore the estimation error for M_0 by the formula (9) does not exceed 10–15 % [Ruff, 1999; Scholz, 2002].

Value of the stress drop characterizes the average difference between the shear stress in the fault prior the earthquake (σ_0) and after it (σ_1) [Gibowicz, Kijko, 1994]. This parameter is determined by the average displacement *D*, normalized

to the characteristic size of the source r_1 , using the following expression [Kostrov, 1975; Kocharyan, 2014; Brune 1970, 1971; Ruff 1999; Mori et al., 2003]:

$$\Delta \sigma = \sigma_0 - \sigma_1 = C_{\sigma} GD/r_1, \qquad (10)$$

where coefficient $C_{\sigma} \sim 1$ by adequate choice of characteristic size r_1 , which may differ from the mentioned above radius *r* in the case of the non-circular source.

For the circular zone of break of a radius r (area $S = \pi r^2$), the characteristic size r_1 can be identified with the radius r, and then the expression for the stress drop $\Delta \sigma$ would take the form $\Delta \sigma = C_{\sigma} M_0 / \pi r^3$. Coefficient C_{σ} for the case of a circular rupture is determined in [Eshelby, 1957]: $C_{\sigma} = 7\pi/16 \approx 1.37$, and the following expression may be obtained from (10):

$$\Delta \sigma = 7M_0 / 16 r^3, \tag{11}$$

which is most often used to estimate the $\Delta\sigma$ from the seismic data [Brune, 1970, 1971; Scholz, 2002].

The source radius r in the expression (11) is determined by the formula [Scholz, 2002; Abercrombie, Rice, 2005; Scuderi et al., 2016]:

$$r = k V_{\rm s} / f_0, \tag{12}$$

where k - a numerical coefficient depending on the break model in the source. Angular frequency f_0 in (12) is characterized by the properties, that the model displacement spectrum S(f) [Scholz, 2002] passes the crossing point, and the corresponding velocity spectrum has a maximum in this point. Substitution (12) into (11) gives a general expression for the stress drop in terms of the seismic moment and angular frequency:

$$\Delta \sigma = (7 / 16k^3) \cdot M_0 f_0^3 / V_s^3, \qquad (13)$$

which will be used below for comparison with dependence of the seismic energy and the specific seismic energy on f_0 .

Beforehand, let us consider the choice of rupture models in the source determining the value of the coefficient k in (12), which can significantly affect the error in computation of the source radius and, hence, the stress drop. Two models are most often used to determine the dynamic parameters of the source from the spectra parameters: the almost classical Brune model [Brune, 1970, 1971] and the Madariaga model [Madariaga, 1976, 1979]. When using the simplest Brune model [Brune, 1970], $k = k_{\rm B} = 0.37$ and expressions (11, 13) determine the so-called Brune radius, $r = r_{\rm B}$. In this source model, it is assumed that the displacement occurs simultaneously and "instantly" over the entire discontinuity plane, which has the form of a circle with a radius *r*. The source zone is spherical with the same radius.

In modern works [Boore, 2003; Abercrombie, Rice, 2005; Lancieri et al., 2012; Kaneko, Shearer, 2014; et al.], the Brune model is characterized as ad hoc, because it does not follow directly from theoretical calculations. Meanwhile, it is based on general physical principles (due to which the low-frequency limit of the spectral displacement density is correctly described, and the decrease of this displacement density is proportional to $1/f^2$ in the high-frequency region). In these and other works, it is argued that the Brune model (expression (12) with the coefficient $k = k_{\rm B} = 0.37$) gives an overestimated value of the source radius. So the estimation of the stress drop $\Delta \sigma$, which is obtained by substituting this value of k in (13), may be underestimated several times [Abercrombie, Rice, 2005]. Nevertheless, the use of the simplest Brune model can be justified when comparing the computations of dynamic parameters with previous results for a given region, obtained by seismogram records at analog stations.

In the Madariaga model [Madariaga, 1976, 1979], a disk-shaped crack is considered as a source; it grows radially with a velocity $V_{\rm R} \sim (0.7-0.9)V_{\rm s}$ and stops, when its radius reaches the maximum value, called the radius of rupture $r_{\rm M}$. The source is considered to be cylindrically symmetrical. In this model, the angular frequency depends not only on the source radius, compared with $r_{\rm M}$, but also on the rupture velocity $V_{\rm R}$. In most studies, for estimating the focal radius it is assumed that $V_{\rm R} \approx 0.9 V_{\rm S}$ [Abercrombie, Rice, 2005; Kaneko, Shearer, 2014; etc.], and then the coefficient k in (12) for the Madariaga model becomes equal to $k = k_{\rm M} = 0.21$. Since the source radius in the Brune model is 1.76 times larger than in the Madariaga model, and the value of stress drop is inversely proportional to the cube of the radius, the discrepancy in $\Delta \sigma$ in these models, turns out to be fivefold (or rather, 5.5 times).

The computations carried out in [Kaneko, Shearer, 2014], which involved the cohesion effects (the limit of the stress value at the front of the growing crack) allowed to improve the Madariaga model (circular expanding crack) and showed, in particular, that at the same rupture velocity of 0.9 $V_{\rm s}$ the coefficient in formulas (12), (13) should be taken equal to $k = k_{\rm KS} = 0.26$ (Kaneko, Shearer). Thus, the source radius is estimated to be 24 % larger in comparison with the Madariaga model, and the stress drop is 1.9 times less than for this one, but 2.9 times larger than for the Brune model.

Other works are also well known [Moskvina, 1969 a, b; Sato, Hirasawa, 1973; Kwiatek, Ben-Zion, 2013], in which the values of the source radius and the stress drop are predicted approximately in the middle between the values of these parameters in the Brune and Madariaga models. In particular, in [Sato, Hirasawa, 1973], a circular rupture model similar to the Madariaga case was considered, and the value of the coefficient $k = k_{\rm SH} = 0.29$ was identified.

Based on the general physical principle of results conformity, it can be confirmed that expression (12) with the Kaneko-Shearer coefficient (k = 0.26) gives the most reliable estimation of the source radius. In the hydrodynamics of continuous media and physical acoustics, the problem of acoustic radiation by an oscillating body in a liquid medium is known and solved [Landau, Livshits, 1988]. The angular frequency f_0 in the spectrum of such radiation is highly correspondent with the "geometric" condition, that half of the wavelength $\lambda/2$ at a given frequency is equal to the overall size (diameter of the radiator), i.e. r = 1/4. Turning from a liquid medium to a solid earth, one can easily obtain expression (12) with a "general physical" estimation of the coefficient $k_{\rm OF} = 0.25$ from the condition that $\lambda = V_{\rm s}/f_0$ for the shear-waves concerned.

Thus, the improved Madariaga-Kaneko-Shearer model appears to be preferred to other models. The value of $k_{\rm KS} = 0.26$ corresponding to this model (very close to the general physical estimation) may be implied as "effective", $k = k_{ef}$ for mass computations with the formulas (12, 13). The difference with estimates of the stress drop obtained for other rupture models (Brune, Madariaga, Sato, etc.) from the results of the $\Delta\sigma$ computation using $k_{ef} = 0.26$ does not exceed 2.9 times. In fact, this is a possible systematic error, which is appropriate to be compared with the cases of 2–3fold discrepancies in the values of the seismic moment in the definitions by different authors. It should be noted, that the Brune model is still being applied in recent works [Ide et al., 2003; Oth et al., 2010; Baltay et al., 2011; Cotton et al., 2013; Pacor et al, 2016; Safonov et al., 2017].

The results of computation of the source radius and the stress drop using any model allow to construct the distribution of these values over the area and in time. These distributions, as well as the relative values of r and $\Delta\sigma$, are more informative than their absolute values.

Further, the computation of the source radius and, accordingly, the level of the stress drop is given for two models: $k = k_{\rm B} = 0.37$ (Brune's model); $k = k_{\rm ef} = 0.26$ (Madariaga–Kaneko–Shearer).

Seismic energy E_s , i.e. a part of the deformation energy, emitted in the form of seismic waves, is also proportional to displacement D and rupture area S, like the seismic moment (4):

$$E_{\rm s} = \sigma_{\rm a} \, S \, D \tag{14}$$

Expression (14) includes apparent stress σ_a (see (3)). It shows the value of shear stress, for which the work done during the displacement on D value.

Seismic energy can be estimated by the spectral parameters of seismic waves Ω_0 and f_0 in a reference point at a distance from the source [Boatwright, 1980], with the contribution of S-waves being the most significant. Compact expressions for E_s can be obtained if the radiation directivity from the source is not taken into account [Boatwright, 1980; Madariaga, 2011]. Here is a simplified derivation of the relationship between E_s and angular frequency f_0 , i.e. the spectrum parameter [Madariaga, 2011]. Since the energy flux density in the wave is proportional to the square of the mass velocity \dot{u}^2 :

$$w(R, t) = \rho V_{\rm s} \dot{u}^2(R, t),$$
 (15)

then neglecting the inhomogeneity mentioned

$$E_{\rm s} = 4\pi R^2 \rho V_{\rm s} \int_0^\infty \dot{u} \,^2(R, t) \, dt =$$

= $4R^2 \rho V_{\rm s} (2\pi)^3 \int_0^\infty f^2 \cdot u_{\rm F}^2 \, df,$ (16)

where $u_{\rm F}$ – Fourier harmonic of displacement, expressed in terms of simple (non-cyclical) frequency *f*. Substitution of the frequency dependence $u_{\rm F}$ in (16) according to the spectral Brune model [Brune, 1970]: $u_{\rm F} = S(f) = \Omega_0 / (1 + f^2 / f_c^2)$ provides the following expression after transformations:

$$E_{\rm s} = 8\pi^4 R^2 \rho V_s \Omega_0^2 f_c^3.$$
 (17)

As seen from (17), seismic energy depends heavily on the parameter f_c , which describes the spectrum behavior in the high-frequency range and has the same physical meaning as f_0 from (12), (13). This may display the sensitivity of E_s to the rupture velocity in a source [Hanks, Kanamori, 1979].

By combining (9) and (17), one can obtain a convenient expression for relationship between the seismic energy, the seismic moment and the angular frequency $(f_c \cong f_0)$ [Madariaga, 2011]:

$$E_{\rm S} = \frac{1}{2} \pi^2 \,\Psi_0^2 \,M_0^2 f_0^3 / \rho V_{\rm S}^5 \approx 2 M_0^2 f_0^3 / \rho V_{\rm S}^5.$$
(18)

Since the *S*-waves velocity is nothing other than $(G/\rho)^{1/2}$, the expression (18) can be simplified, and it followed from (18), that the specific seismic energy is proportional to the factor $(f_0 / V_s)^3$:

$$e_{\rm PR} = 2 \left(M_0/G \right) f_0^3 / V_{\rm S}^3 \tag{19}$$

Since the $V_{\rm s}/f_0$ ratio characterizes the source radius *r* [Brune, 1970, 1971], the cube of its value is proportional to the source volume, and therefore $e_{\rm PR}$ can be expressed in terms of the volume density of the seismic moment and the shear modulus (average parameter).

One can see from (19) that the specific seismic energy, quite like $\Delta \sigma$ in (11), depends on the volume density of the seismic moment only. Expressions (13), (19) provide the relation between $e_{\rm PR}$ and $\Delta \sigma$:

$$e_{\rm PR} = 32 \, k^3 \Delta \sigma \,/\, 7G \,, \qquad (20)$$

where coefficient of proportionality k is determined by the choice of the source model only (Brune, Madariaga etc.) and does not depend on the angular frequency and the dynamic parameters. Since $\Delta \sigma$ and $e_{\rm PR}$ are proportional to each other, $e_{\rm PR}$ can be estimated by $\Delta \sigma$ value and conversely.

Estimates of the stress drop and the specific seismic energy (review of the results)

Specific seismic energy $e_{\rm PR}$, as a characteristics of rock destruction, is convenient for comparison of events of various scales [Kocharyan, 2016]. Under the assumption that the similarity conditions are satisfied and the source zone physics is unified, the value of $e_{\rm PR}$ should not depend on the scale.

Scaling (scaling dependence, model) of the specific seismic energy is automatically extended to the stress drop, because these parameters are proportional to each other. With this in mind, we will consider the results both for the stress drop

and for the specific seismic energy (or the energy $E_{\rm s}$ itself, recalculated to $e_{\rm pR}$).

It is generally believed, that both the stress drop and the apparent stress σ_a (14) should be roughly proportional to the level of stresses acting on the fault. So, it seems natural that an increase

in the level of lithostatic stresses should, on average, bring to a proportional increase in $\Delta \sigma$ and σ_{a} . For example, in [Rautian, Khalturin, 1991], a growing trend was noted for apparent stress with increasing depth for both crustal and deep earthquakes in the Pamir. At the same time, other studies [Choy, Boatwright, 1995; Rodkin, 2001a; Choy et al., 2006] for crustal earthquakes did not found any significant increases in $\Delta \sigma$ and σ_{α} with the source depth. Thus, according to the data of [Rodkin, 2001b], the apparent stress, on average, increases by 1.5 times with a growth of the source depth from 10 to 50 km, i.e. an increase in lithostatic stress by more than 5 times.

Reviewing the results of laboratory experiments [Kocharyan et al., 2013], one can conclude that even a small change in the characteristics of the fault filler has a radical effect on the stress jump amplitude; at this, such a change does not practically affect the value of the Coulomb fracture strength.

A significant scatter of the values of $\Delta\sigma$ (and, accordingly, e_{PR}) is a fairly common result, which has been noted in various works [Gibowicz, Kijko, 1994; Tomic et al., 2009, Hua et al., 2013]. Figure 1 a demonstrates a similar scatter when plotting the distributions of the angular frequency as a function of M_0 on a double logarithmic scale, according to [Hua et al., 2013]. In this case, the family of straight lines with a given slope corresponds to the $\Delta\sigma$ values. Figure 1 b shows a similar construction for the data obtained in this work, as well as from other sources.

Explanations of a wide scatter of the $\Delta \sigma$ values are most often limited by gen-

eral considerations about the heterogeneity of the geophysical medium and the different strength of the material.

In the works of M.V. Rodkin [Rodkin, 2001 a, b], a number of contradictions in traditional models of source domain is considered, and the



Figure 1. Angular frequency depending on the seismic moment: a – graph from [Hua et al., 2013]. Dashed lines show the stress drop 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 and 100 MPa. Vertical dashed line designates the limit of maximum amplitude for the data [Hua et al., 2013]. Pink circles are the data on induced seismicity appeared when the Longtan reservoir filling (about 15 thous. of events at the depth from 4 to 10 km); Other symbols designate the data from [Allmann, Shearer, 2009]; b – the data for regions: BGP (Bishkek geodynamic polygon) according to [Sycheva, Bogomolov, 2016]; BGP (KIS, Kyrgyz Institute of Seismology) – (Grin et al., 2002¹; Kal'met'eva et al., 2003²); Central Tien Shan – [Sycheva, 2020]; BRZ (Baikal rift zone) – [Dobrynina, 2009]; Crimea – [Pustovitenko et al., 2013]. Boundaries are marked with red lines according to the Figure 1 a.

¹ [Explanatory note to the completion protocol for III, IV quarters of 2001 and I quarter of 2002]. Authors: Grin T.P., Kal'met'eva Z.A., Chekhovskaya R.A. [Experimental and methodical expedition of the NAS of KR], 2002, 66 p.

² [Explanatory note to the completion protocol of the works on processing and using the data of KNET for III quarter of 2002, I, II, III quarters of 2003]. Authors: Kal'met'eva Z.A., Moldobekova S.K., Chekhovskaya R.A. [Experimental and methodical expedition of the NAS of KR], 2003, 124 p

incompleteness of such explanations is noted. Within the framework of the fluidmetamorphogenic model of seismogenesis, he proposed an alternative interpretation of the different results shown in Figure 1 a.

Hypothetically, one of the factors, contributing to the scatter of $\Delta \sigma$ values, is the peculiar properties of technogenic earthquakes sources. In a number of works, it was previously assumed that for such sources the average stress drop is lower than for natural earthquakes [Fehler, Phillips, 1991; Abercrombie, Leary, 1993; McGarr, 1993; etc.]. The assumptions leaned upon the statistics for a large number of seismic events, according to which the values of the angular frequency of technogenic earthquakes are lower, when compared to ordinary tectonic ones. The stress drop turns out to be lower too, at close values of M_0 , since, according to (13), $\Delta \sigma \sim M_0 f_0^3$. This gener-alization applies primarily to weak seismic events for which the dynamic parameters were not computed using the Brune model. For strong technogenic earthquakes (mainly with M > 4.5), when using the Brune model, the estimated differences in f_0 estimates become insignificant or are not observed at all [Tomic et al., 2009; Hua et al., 2013]. It is important to note that such events are characterized by pure shift, as well as natural tectonic earthquakes.

Value of the stress drop is on average about 3 MPa for interplate earthquakes, and for intraplate ones it is about 10 MPa. This complies with the specific seismic energy values according to (20): $e_{\rm pp} \sim 0.2 \cdot 10^{-4}$ for interplate earthquakes and

 $e_{\rm PR} \sim 0.8 \cdot 10^{-4}$ for intraplate ones. According to the results of computations carried out in [Sycheva, 2020] and in this work below (see the table in the Appendix, hereinafter A1, and in web of the Journal in format Excel), for intraplate earthquakes on the territory of BGP and the Central Tien Shan, the average value of the stress drop is 10.8 and 10.5 MPa, and the median averaged values of $\Delta\sigma$ are 1.7 and 3.5 MPa respectively.

We now turn to a review of the results for the specific seismic energy, or the emitted energy E_s , which can be converted to $e_{\rm PR}$ by simple calculation. Noteworthy is the E_s and $e_{\rm PR}$ data for the seismic events near mining plants, where dense seismological networks have been deployed according to the technology. It is natural to compare the results of mass determinations of $e_{\rm PR}$ and $\Delta\sigma$ in the Northern and Central Tien Shan (according to the KNET network) with these data.

Figure 2 a shows the examples of measurements of the seismic energy and the seismic moment obtained at the mines in Poland (Rudna mine) and Finland (Pyhäsalmi mine). In the area of the Rudna copper mine, the events with the moment magnitudes from 1.4 to 3.5 were studied [Domański, Gibowicz, 2008]. The dynamic parameters were determined for approximately 600 events, and all their sources had a mechanism of the horizontal shift. It follows from the results [Domański, Gibowicz, 2008] that the dependence of the specific seismic energy on the value of M_0 is described by the model:

$$e_{\rm PR} = 3.8 \cdot 10^{-10} \, M_0^{0.28}, \tag{21}$$



Figure 2. Emitted energy E_s dependence on the value of the seismic moment M_0 : a – for the events at the Rudna (1) and Pyhäsalmi (2) mines; b – for the events at the Strathcona mine, Sudbury field (1) and at the underground observatory in Manitoba, Canada (2). Hereinafter the symbols are measurements results, lines – the best approximation. The figure is from [Besedina et al., 2015].

which corresponds to the solid line in Figure 2 a (graph 1). The correlation (21) shows that the value of $e_{\rm PR}$, as well as the proportional parameter $\Delta\sigma$ ($\Delta\sigma \sim e_{\rm PR}$), increases with the growth of the seismic moment. Thus, the similarity condition is not met.

Figure 2 a (graph 2) also presents the results of E_s and M_0 measurements for weak seismic events probably caused by mining activity at the Pyhäsalmi mine [Oye et al., 2005]. For the Pyhäsalmi mine, where the mining depth reaches 1400 m (more than that in the previous example), at a fairly significant level of tectonic stresses, the $e_{\rm PR}(M_0)$ dependence can be described in the following form:

$$e_{\rm PR} = 3.6 \cdot 10^{-9} \, M_0^{0.28}, \tag{22}$$

where the power-law dependence on the seismic moment is the same as in (21), but the coefficient is an order of magnitude greater.

At the observatory in Manitoba, Canada, the seismic events were recorded during the drilling and blasting drivage of vertical shaft 4.6 m in diameter in weakly fractured granite at a depth of about 400 m [Gibowicz et al., 1991]. After each blast, the number of events was increasing rapidly during 2 h, followed by an exponential decay to the background level. It follows from the results of [Gibowicz et al., 1991], that the model relationship (regression shown in Figure 2 b, graph 2) for the specific seismic energy can be written in the form:

$$e_{\rm PR} = 3.1 \cdot 10^{-7} \, M_0^{0.33}. \tag{23}$$

For microseismic events associated with a drivage in the Strathcona mine of the Sudbury field (Canada) at a depth of about 700 m [Urbancic, Young, 1993], the dependence constructed from the results of E_s and M_0 measurements (Figure 2 b, graph 2) is equivalent to the following model for e_{pp} :

$$e_{\rm PR} = 1.24 \cdot 10^{-10} \, M_0^{0.7}. \tag{24}$$

This model indicates a deviation from the similarity law more significant than in the previous examples.

For seismicity, induced by reservoir filling in China (1616 earthquakes in the range of magnitude $M_{\rm L}$ 0.1–4.2 [Hua et al., 2013]), the power-law dependence $e_{\rm PR} \sim M_0^{0.63}$ was identified with an exponent close to (24).

Two model relationships (regressions) $E_s(M_0)$ with exponents significantly exceeding unity were obtained. For the seismicity initiated by massive explosions at the Tashtagol mine (Figure 3 a) [Malovichko A., Malovichko D., 2010]. The measurements were carried out in 2006 (graph 1) and 2008 (graph 2) in the same place before and after a series of blasts with similar mass of charge. The $e_{\rm PR}$ dependences for two graphs in Figure 3 a are described by the expressions:

$$e_{\rm PR} = 4.6 \cdot 10^{-15} M_0^{0.97}, \ e_{\rm PR} = 2.6 \cdot 10^{-11} M_0^{0.67} \ (25)$$

Expressions (25) and Figure3 a show, that for the events occurred in 2008 the value of emitted energy is, on average, in order of magnitude higher than for events of 2006, but the power at M_0 in the second case is lower than in the first one.



Figure 3. Dependence of the emitted energy E_s on the value of seismic moment M_0 : a – for the events at Tashtagol field during measurements of 2006 (1) and 2008 (2) according to the data of [Malovichko A., Malovichko D., 2010]; b – for the events at the deep mines of South Africa according to the data of: 1 – [McGarr, 1994], 2 – [Yamada et al., 2007]; 3 – [Kwiatek et al., 2011]. The figure is from [Kocharyan, 2016].

Figure 4 presents an estimate of the specific seismic energy according to the data on the dynamic parameters of the sources of seismic events at quarries and mines of Vorcuta [Besedina et al., 2015]. The value of $e_{\rm PR}$ is in the range ~ 10^{-7} – 10^{-5} , and the best power-law approximation can be written in a form:

$$e_{\rm pR} = 5.6 \cdot 10^{-7} \, M_0^{0.16}. \tag{26}$$

A generalization [Kocharyan, 2016] shows that averaging over all published data on the emitted seismic energy brings to the dependence $E_s(M_0)$ very close to linear. The corresponding regression for the specific seismic energy is described by expression:

$$e_{\rm PR} = 2.3 \cdot 10^{-6} M_0^{0.04}, \qquad (27)$$

in which the near – zero power of M_0 may indicate the realization of the geometric similarity [Kocharyan et al., 2016]. This result is in accordance with the conclusions [Baltay et al., 2011; Shaw et al., 2015] and other works on the statistical independence of $\Delta\sigma$ from the seismic moment or magnitude, due to the proportionality of the values of $e_{\rm PR}$ and the stress drop $\Delta\sigma$ (20). According to [Kocharyan et al., 2016], the similarity relations are the most accurate for medium-scale earthquakes: in the range of $10^{15} < M_0 < 10^{20}$ N·m (3.9 $< M_{\rm W} < 7.3$). For weak seismicity, primarily technogenic, a significant scatter of the exponents of the power-law dependence of $e_{\rm PR}$ on the seismic



Figure 4. Dependence of the specific seismic energy on the event scale in the vicinity of Vorcuta mining plants, the line is a regression with a determination factor R = 0.89, according to [Besedina et al., 2015].

moment is noted. For the above examples of regressions (21)–(27), the range of changes in these exponents is from -0.2 to 0.97, which indicates a deviation from self-similarity of earthquake sources [Kocharyan et al., 2016]. The higher the exponent in the $e_{\rm PR}(M_0)$ dependence, the more pronounced the difference from self-similarity.

The presence of an increasing dependence (regression) of the specific seismic energy on M_0 can be confirmed using the results of the angular frequency f_0 determination, obtained in (Grin et al., 2002³; Kalmetyeva et al., 2003⁴; [Dobrynina, 2009; Pustovitenko et al. others, 2013; Sycheva, Bogomolov, 2016; Sycheva, 2020]) (Figure 1 b). Using expression (19) it is possible to compute the value of $e_{\rm PR}$ for each event by the data on the angular frequency and the seismic moment. Figure 5 shows the results of computation of the specific seismic energy of earthquakes in the same regions as shown in Figure 1 b (according to the data from the cited sources). This figure also shows the $e_{\rm PR}$ values for the events in a zone around the South Kuril Islands, determined from the values of the seismic energy E_s and the seismic moment M_0 from the catalog of earthquakes DP in the northwestern Pacific for 1969–1996 [Burymskaya, 2001].

According to Figure 5, main range of values of the specific seismic energy is from 10^{-6} to 10^{-3} , when the range of seismic moment M_0 is from 10^{13}



Figure 5. The specific seismic energy depending on the seismic moment for the earthquakes in the same regions as shown in Figure 1 b, as well for the South Kuril Islands (according to the materials [Burymskaya, 2001; Bogomolov et al., 2015]).

³ Explanatory note..., 2002.

⁴ Explanatory note..., 2003.

to 10^{18} N·m. The value of $e_{\rm PR}$ varies within the widest range for the Baikal rift zone and the Central Tien Shan. For the Northern Tien Shan (BGP), the variation range of $e_{\rm PR}$ is narrower, from $2 \cdot 10^{-6}$ to $3 \cdot 10^{-4}$. Figure 5 shows, that the distributions of $e_{\rm PR}$ values on a double logarithmic scale admit a linear regression (linear dependence of $\ln e_{\rm PR}$ on $\ln M_0$) in all studied regions. This regression is equivalent to the power-law dependence $e_{\rm PR}(M_0)$. The form of the dependence of the specific seismic energy on the seismic moment for each of the studied regions is given in the Table 1.

According to the Table 1, the power of M_0 in the expressions describing the relationship between $e_{\rm PR}$ and M_0 vary from 0.39 to 0.81. The highest value of exponent, indicating a deviation from self-similarity, was noted for the Baikal rift zone, and the lowest one – for the Central Tien Shan.

Concluding the discussion of the results on specific seismic energy, noting again the proportionality of the e_{pR} and $\Delta\sigma$ values. Due to this, the power regressions for e_{pR} can be extended to the stress drop in the same regions. Possible reasons for the deviation from the similarity law for seismicity localized in certain regions are detail discussed in [Kocharyan, 2012], where it is noted that the dependence of the elastic modulus of the rock on the scale plays the main role for the weak events. This explanation, most likely, may be referred to the Northern and Central Tien Shan.

Mass estimates of the stress drop and other dynamic parameters of the earthquake sources in the Northern Tien Shan

This section presents the results of a study of the dynamic parameters of the sources of 183 earthquakes (K = 8.7-14.8) occurred in the Northern Tien Shan (on the territory of BGP) during the period 1998–2017. On the example of this region, the relationship between the stress drop and the value of the seismic moment, the type of focal mechanism, and other parameters has been studied in detail. For the 183 considered events, focal spectra of seismograms were constructed and the following dynamic parameters were determined: scalar seismic moment M_0 , focal radius r, values of shear stress drop $\Delta \sigma$, seismic energy E_s and specific seismic energy $e_{\rm PR}$ were determined. Computation technique of the DP by the parameters of focal spectra, adapted for the seismograms recorded by the KNET network [Sycheva, 2016], was described in detail in previous works [Sycheva, Bogomolov, 2014, 2016]. The results of the DP computation are presented in the table A1 (see the Appendix). For most part of the considered earthquakes (158 out of 183 events), the type of focal mechanism was determined by the signs of the P-waves first arrivals (using the same technique as in [Sycheva et al., 2005]).

Region	Source	Determinations quantity, N	$e_{\rm PR}(M_0)$
BGP (by the data of Kyrgyz Institute of Seismology)	[Grin et al., 2002 ⁵ ; Kal'met'eva et al., 2003 ⁶]	30	$3.3 \cdot 10^{-10} M_0^{0.39}$
Central Tien Shan	[Sycheva, 2020]	150	$5 \cdot 10^{-12} M_0^{0.47}$
Baikal rift zone	[Dobrynina, 2009]	62	$2.7{\cdot}10^{{-}17}M_0^{0.81}$
Southern Kurils	[Burymskaya, 2001]	171	$1.6{\cdot}10^{-12}M_0^{0.43}$
Crimea	[Pustovitenko et al., 2013]	58	$2.1{\cdot}10^{-12}M_0^{0.47}$
Rudna mine, Poland	[Domański, Gibowicz, 2008]	~600	$3.8{\cdot}10^{-10}M_0^{0.28}$
Pyhäsalmi mine, Finland	[Oye et al., 2005]	No data available	$3.6 \cdot 10^{-9} M_0^{0.28}$
Tashtagol mine,	[Malovichko A., Malovichko D.,		$4.6 \cdot 10^{-15} M_0^{0.97} (2006)$
mountain Shoriya	2010]	~	$6 \cdot 10^{-11} M_0^{0.67}$ (2008)
Quarries and mines, Vorcuta	[Besedina et al., 2015]	«	$5.6 \cdot 10^{-7} M_0^{0.16}$
Yunnan province, China	[Hua et al., 2013]	1616	$\sim M_0^{0.63}$

Table 1. Regression dependences of the specific seismic energy on the seismic moment for various regions and zones of Northern Eurasia and adjacent areas

⁵ Explanatory note..., 2002.

⁶ Explanatory note..., 2003.

The values of the spectral parameters: the angular frequency f_0 and the spectral density Ω_0 , which are the initial values for the DP computation are given in the Table 1 (columns 9, 10). For the considered events (M = 2.7–6.0), Ω_0 varies from 2.6.10⁻⁶ to 9.5.10⁻² m·s, and f_0 varies from 1.7 to 6.0 Hz (that corresponds to a rupture time in the source of 0.6–0.17 s). The data on Ω_0 and f_0 allow to compute the values of the earthquake dynamic parameters in the Northern Tien Shan. The values of rock density in the source and the shear wave velocities were taken respectively equal to $r = 2.6 \text{ g/cm}^3$ [Chediya, 1986] and $V_s = 3.5 \text{ km/s}$ [Roecker et al., 1993] for computation of the scalar seismic moment M_0 , source radius r, stress drop $\Delta \sigma$, emitted seismic energy E_s , and specific seismic energy $e_{\rm PR}$ according to the expressions (9), (11)–(13), (17), (18). The results of computation of these dynamic parameters are presented in the Table A1 in the columns 11–17.

Table 2 shows the correlation coefficients between the dynamic parameters of earthquake sources and their magnitude, between the scalar seismic moment and other DP, as well as some regression dependences. The highest correlation coefficient is between the seismic moment M_0 and the seismic energy E_s (k = 0.98), the lowest one is between M_0 and the angular frequency (k = 0.59).

Consider the features of the distributions of the parameters of the spectral characteristics Ω_0 , f_0 and dynamic parameters for 183 events from the Table A1.

Table 2. Regression dependences and correlation coefficients between the dynamic parameters of earthquake sources and their magnitude and the seismic moment

Parameters	k	Model
$e_{\mathrm{PR}} \leftrightarrow M_0$	0.74	$e_{\rm PR} = 6 \cdot 10^{-14} M_0^{0.59}$
$\Delta \sigma \leftrightarrow M_0$	0.74	$\Delta \sigma = 3.0 \cdot 10^{-8} M_0^{0.59}$
$f_0 \leftrightarrow \lg M_0$	0.85	$f_0 = -1.16 \lg M_0 + 21.0$
$\lg \Omega_{_0} \leftrightarrow M$	0.89	lg $\Omega_0 = 1.11 M - 8.27$
$\lg M_0 \leftrightarrow M$	0.89	$\lg M_0 = 1.11 \ M + 10.1$
$\lg E_{\rm S} \leftrightarrow \lg M_{\rm 0}$	0.98	$\lg E_{\rm s} = 1.59 \lg M_0 - 13.2$
$\lg e_{_{\mathrm{PR}}} \leftrightarrow \lg M_{_0}$	0.92	$\lg e_{\rm PR} = 0.59 \lg M_0 - 13.2$
$\lg e_{_{\mathrm{PR}}} \leftrightarrow M$	0.78	lg $e_{\rm PR} = 0.63 \ M_0 - 7.1$
$r_{_{\rm M}} \leftrightarrow \lg M_{_0}$	0.84	$r_{\rm M} = 81.0 \lg M_0 - 926.4$

Note. Regression dependences for the source radius and the stress drop are given for the Madariaga–Kaneko–Shearer model.

The spectral density and the scalar seismic moment

The distribution of the parameter Ω_0 (on a logarithmic scale) depending on the magnitude is shown in Figure 6 a, the distribution of the scalar seismic moment for the same events $(M_0 \sim \Omega_0)$ is shown in Figure 6 b. These logarithmic distributions are well described by the ramping up trend. For the scalar seismic moment, the regression of lg M_0 and M (the best model) can be written in the form:

$$\lg M_0 = 1.1 \text{ M} + 10.1. \tag{28}$$



Figure 6. Logarithmic distributions of the spectral density (a) and the scalar seismic moment (b) depending on the magnitude.

The correlation coefficient between the values of $\lg M_0$ and M is 0.89. The deviation relative to the linear model (regression lines in Figure 6 b) has a uniform character over the entire range of the considered magnitudes.

For the considered events, the magnitude range is $-2.2 \le M \le 6.0$, and the values of M_0 are in the range from $2 \cdot 10^{12}$ go $2.2 \cdot 10^{17}$ N·m. Due to the presence of scatter and a relatively narrow range of magnitudes, the distribution of $\lg M_0$ also complies (with the accuracy of 10 %) with the well-known expression (1) [Riznichenko, 1985].

Taking into account the high value of the correlation coefficient between the magnitude and the logarithm of the seismic moment, below we will consider the DP distribution depending on $\lg M_0$ in some cases.

The angular frequency and the source radius

Figure 7 shows the distribution of f_0 depending on lg M₀. The values of angular frequency are typically fall with increasing of lg M₀ or the magnitude (Figure 7a). The source radius was determined by the values of the angular frequency using the expression (12). To ease the comparison with the other works, the table A1 provides the values of the source radius according to the Brune model, $r_{\rm B}$, with a factor in (12) equal to k = 0.37 (column 12), and for the Madariaga–Kaneko–Shearer model, $r_{\rm M}$, with k = 0.26 (column 14). The distribution of $r_{\rm M}$ values depending on the logarithm of the seismic moment is shown in Figure 7 b. Range of the radius $r_{\rm M}$ is approximately 150–450 m. The value of the Brune radius is 1.42 times greater than $r_{\rm M}$, and the $r_{\rm B}$ values belong the interval from approximately 210 to 640 m.

Distribution of the source radiuses in Figure 7 b admits a linear approximation in value of $\lg M_0$: $r_{\rm M} = 81 \lg M_0 - 926 = 98M - 135$. Deviations of $r_{\rm M}$ from the linear model for the events with $\lg M_0 < 14.5$ were lower than that for the events with $\lg M_0 \ge 14.5$. The correlation coefficient between values of the $r_{\rm M}$ and $\lg M_0$ is about 0.84.

The seismic energy and the specific seismic energy

Logarithmic distribution of the seismic energy E_s and the specific seismic energy $e_{\rm PR}$ versus the values of $\lg M_0$ is shown in Figure 8. The seismic energy varies in the range from $1.0 \cdot 10^7$ to $7.6 \cdot 10^{12}$ J (see the Table A1, column 16). The linear model describing the E_s distribution has the form of $\lg E_s = 1.59 \lg M_0 - 13.2$, and the correlation coefficient between the seismic energy and the scalar moment is k = 0.98 (Figure 8 a). The $e_{\rm PR}$ parameter for the considered events is of the order from $0.2 \cdot 10^{-5}$ to $\sim 10^{-3}$ (see the Table A1, column 17). The distribution of $\lg e_{\rm PR}$ is also described by a linear model (Figure 8 b), although, in this case, scatter of values relative to the regression line is greater in comparison with the case in Figure 8 a. The expression for the linear model (regressional dependence) has a form

$$lg e_{PR} = 0.59 \ lg M_0 - 13.2 = 0.64 \ M - 7.1,$$

M_0 (N·m), (29)

and the correlation coefficient between the value of $\lg e_{\rm PR}$ and the magnitude is 0.78. Dependence (29) can also be written in a power-law



Figure 7. The values of the angular frequency (a) and the source radius (b) (according to the Madariaga–Kaneko–Shearer model) in comparison with $\lg M_0$.



Figure 8. Distribution of the seismic (a) and the specific seismic (b) energy depending on the seismic moment on a double logarithmic scale.

form: $e_{\rm PR} = 7 \cdot 10^{-14} M_0^{0.59}$ indicating the power of M_0 , which is important for comparison of the DP in different regions. This exponent is also significant in relevance to the similarity of earthquake sources.

Figure 8 b shows, that the e_{PR} values are localized in a band, which boundaries are parallel to the approximating straight line: about 95 % of significant points fall within such bands. The boundaries of the localization band of the lg e_{PR} values in Figure 8 b are determined by the relation: 0.59 lg $M_0 - 13.6 \le \log e_{PR} \le 0.59 \log M_0 - 12.9$.

The stress drop and their approximations (regressions)

The values of the stress drop determined by the Madariaga–Kaneko–Shearer model, lie in the range from 0.6 to ~120 MPa (see the Table A1), except for one event – Kochkor earthquake, December 25, 2006, which parameters are $M_0 \sim 2 \cdot 10^{17}$ N·m and $\Delta \sigma \sim 630$ MPa, that radically differs from the parameters of other events. During the statistical data processing, it was excluded from the computations.

In accordance with the expressions (11), (12) the values of $\Delta\sigma$ for the Brune model (describing the values of the source radius 1.42 times greater than the Madariaga–Kaneko–Shearer model) are 2.9 times less than that given above. Distribution of the stress drop along with the values of $\lg M_0$ is shown in Figure 9 a. The best approximation of the $\Delta\sigma$ distribution is a power-law dependence on M_0 . Let us explain this circumstance. According to the expressions (13), (19), (20), the values of

the stress drop and the specific seismic energy are proportional to each other: $\Delta \sigma \sim e_{\rm PR}$. Therefore, the distribution of lg $\Delta \sigma$ may differ from the distribution of lg $e_{\rm PR}$ (Figure 8 b) only by a vertical shift by some constant. For the computation results $\Delta \sigma$ (Table A1), the following approximation was obtained: $\Delta \sigma = 3.0 \cdot 10^{-8} M_0^{0.59}$. The correlation coefficient between the stress drop and the seismic moment is k = 0.74 (Table 2).

One can see in Figure 9 a, that scatter of $\Delta \sigma$ values relative to the regression line increases for the events with lg $M_0 > 14.5$ (magnitudes M > 4.0 according to (28)). Taking this into account, the issue of correlations between $\Delta \sigma$ and lg M_0 were analyzed in more details. For this purpose, several samples of the events were formed (Table 3), and the correlation coefficients were determined for each of them. The first two samples were specified in accordance with the values of lg M_0 , the energy scale of the events from Table A1

Table 3. Regressions dependences and correlation coefficient between the stress drop and the seismic moment for various samples of the events

Sample for $\Delta \sigma$	k	Model
All Δσ	0.74	$\Delta \sigma = 3 \cdot 10^{-8} M_0^{0.59}$
$\log M_0 < 14.5$	0.89	$\Delta \sigma = 4 \cdot 10^{-11} M_0^{0.8}$
$\lg M_0 \ge 14.5$	0.65	$\Delta \sigma = 6 \cdot 10^{-7} M_0^{0.50}$
$\Delta \sigma < 10 \text{ MPa}$	0.57	$\Delta \sigma = 4 \cdot 10^{-8} M_0^{0.58}$
$\Delta \sigma \ge 10 \text{ MPa}$	0.67	$\Delta \sigma = 8 \cdot 10^{-5} M_0^{0.37}$



Figure 9. The stress drop distribution (the Madariaga–Kaneko–Shearer model) for 182 events from the Table A1 compared with the values of lg M_0 (a), and the result of the significant points clustering (b) in the $\Delta\sigma(M)$ graph according to the following criteria: $\Delta\sigma \ge 10$ MPa (red dots) and $\Delta\sigma < 10$ MPa (black dots).

with $\lg M_0 < 14.5$, and the second sample – by ones with $\lg M_0 \ge 14.5$. Two more samples were formed on the basis of the stress drop: the third sample included events with $\Delta \sigma < 10$ MPa, and the fourth one – $\Delta \sigma \ge 10$ MPa. A distinction based on the $\Delta \sigma$ criterion closely matches the selection of two clusters in the distribution of significant points in Figure 9 b resulted from application of the GDBSCAN clustering algorithm [Ling, 1972; Sander et al., 1998]. The distribution of the stress drop for the first two samples is shown in Figure 10 a, for the latter ones – in Figure 10 b.

Table 3 presents the values of correlation coefficients between the stress drop and the logarithm of the seismic moment for the samples described above, as well as for the general sample from 182 events. For the samples with $\lg M_0 \ge 14.5$ and $\Delta \sigma \ge 10$, the correlation coefficients are lower than that for the general sample, and a significant scatter of values in relation to the regression line is observed. A high correlation coefficient for the events with $\lg M_0 < 14.5$ becomes evident in the graph in Figure 10 a, since the points of the values of $\Delta \sigma$ in this figure are localized closer to the regression line to a greater extent than the points for another sample of events (in crimson). The correlation coefficient is low for $\Delta \sigma < 10$ MPa is low, that is explained by a small change in the values of the stress drop for the considered sample of the events (black dots in Figure 10 b).



Figure 10. The stress drop distribution depending on a logarithm of the scalar seismic moment: a – for the events with $\lg M_0 \le 14.5$ – highlighted in black, $\lg M_0 \ge 14.5$ – highlighted in crimson; b – for the events with $\Delta \sigma \le 10$ – highlighted in black, for $\Delta \sigma \ge 10$ MPa – highlighted in crimson.

Obtained regressions, in which the power of M_0 exceeds 0.37, as well as Figure 10, point to the absence of self-similarity for the earthquakes' sources on the BGP territory in terms of the stress drop and the specific seismic energy.

Stress drop and focal mechanisms

To study this dependence of the values from the Table A1, we selected the events, in which the stress drop was more than 29 MPa (according to the Madariaga-Kaneko-Shearer model, column 15 in the Table A1). The number of such events is 20. We also selected 20 events with the minimum value of the stress drop. It is worth to remind, that the column 13 in the Table A1 shows the values of $\Delta \sigma$ according to the Brune model, which were considered in previous works [Sycheva, Bogomolov, 2014, 2016]. Figure 11 shows the epicentral position and focal mechanisms of the earthquakes from these two quantiles. The position of the events of the first group is highlighted in black, the second one - in gray, and their focal mechanisms are shown in the upper and lower parts of the figure, respectively. The spatial position of the events of the two classes coincides only partly. Most part of the events of the first sample is of thrust focal mechanism only (3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 17, 18, 19) or thrust-shift one with a minimal shift component (1, 2, 5, 6, 14, 20). For the second sample, the main part of events is formed by thrustshifts or strike-slips; only events no. 10, 11, 12, 15, 17, 18 can be classified as thrusts. The observed distribution of mechanisms can demonstrate the presence of a relationship between the type of focal motion (the mechanism) and the stress drop.

For a more detailed analysis of the relationship between the stress drop and the types of the focal mechanism according to the Table A1, we selected the samples for the most common types of focal movements: thrusts (TH, 57 events), thrust-shifts (TH-S), 38 events, including oblique faults), and horizontal shifts (SH, 46 events). For thrusts, the median average of $\Delta \sigma$ is 4.9 MPa, for thrust-shifts – 6.1 MPa, and for horizontal shifts – 3.7 MPa. The percentage of events with certain values of the stress drop is determined for each sample. Information on the distribution of the number of events of the three most common types of focal mechanisms (TH, TH-S, and SH) is presented in the Table 4 and Figure 12 with the color markers.



Figure 11. Epicentral position of the events from two samples for $\Delta \sigma$ and focal mechanisms of these events. Black circles – the events with $\Delta \sigma > 29$ MPa, grey circles – the events with minimum values of $\Delta \sigma$ (according to [Sycheva, Bogomolov, 2016]).

the territory of DOT (according to the data of the fusie (iii)				
Δσ	ТН	TH-S	SH	
interval, MPa	N (%)	N (%)	N (%)	
0-1	_	_	1 (2.2)	
1–3	15 (25.4)	9 (23.7)	16 (33.3)	
3-9	21 (36.4)	14 (36.8)	18 (40)	
9–27	11 (20)	11 (28.9)	8 (17.8)	
27-81	9 (16.4)	3 (7.9)	2 (4.4)	
>81	1 (1.8)	1 (2.6)	1 (2.2)	
All Δσ	57	38	46	

Table 4. The distribution of the events of different types of focal mechanisms over the intervals of the stress drop on the territory of BGP (according to the data of the Table A1)

It is seen from the Table 4, that more than 70 % of the events of shift type (SH) are in the range of to the stress drop of 1–9 MPa. For thrusts and thrust-shifts the distributions are wider, and the absolute and relative quantity of the events of TH-type are greater than SH-type for all stress drop intervals in the range $\Delta \sigma > 9$ MPa.

A somewhat different sampling was carried out in order to validate statistically the prevalence of thrusts and thrust-shifts (oblique faults, in particular) among the events with the stress drop exceeding 9–10 MPa, a somewhat different sampling was carried out. Since the median average of $\Delta \sigma$ for the entire catalog (Table A1) is 4.9 MPa, it is possible to form two samples with an equal number of events with known DP and type of focal mechanism. This is a sample of the lower stress drop, $\Delta \sigma < 5$ MPa, and a sample of the events with $\Delta \sigma > 5$ MPa. For each sample, we identified the percentage of thrusts, thrust-shifts (oblique faults), horizontal shifts and vertical shifts (incisions), as well as normal faults and normal faults with the strike-slip component, i.e. of all realized types of focal movements according to the wellknown classification [Yunga, 1990; Sycheva et al., 2005]. The results are shown in Table 5.

As it is seen from the Table 5, the thrust events were almost equally distributed between the

Table 5. The events distribution	over the type of focal mechanis	m for various ra	inges of $\Delta \sigma$
(according to the data in Table A1))		-

Movement type	General sample	$\Delta \sigma < 5 MPa$	$\Delta \sigma \ge 5 MPa$
	N (%)	N (%)	N (%)
Thrusts (TH)	57 (35.7)	28 (35)	28 (36.4)
Horizontal shifts (SH)	46 (29.3)	30 (37.5)	16 (20.8)
Thrust-shifts (TH-S)	38 (24.2)	16 (20)	22 (28.6)
Normal faults (NF) and normal faults with strike-slip component (NF-S)	11 (7)	4 (5)	7 (9.1)
Vertical shifts (SV)	6 (3.8)	2 (2.5)	4 (5.2)
All focal mechanisms	158	80	77



Figure 12. Histogram of earthquakes number of different types of focal mechanisms over the stress drop intervals. TH - thrusts, TH-S - thrust-shifts, SH - horizontal shifts.

samples of smaller and larger $\Delta \sigma$. The fraction of thrust-shift events is greater for the sample of $\Delta \sigma \geq 5$ MPa than that in the case of the sample with $\Delta \sigma < 5$ MPa. But the fraction of SH events in the first sample is less than that in the second. Therefore, the events with focal mechanisms of the TH and TH-S types prevail at increased values of the stress drop, that is also seen in Figure 12.

The stress drop and intensity of seismotectonic deformation

When computing the direction and intensity of seismotectonic deformation (STD), the studied territory of the BGP was divided into elementary circular zones with a radius of 0.2° , with the centers at the nodal points of a specially selected grid.

Table 6. The stress drop ranges for the earthquakes on the territory of the BGP (see Figure 13)

Number of events	$\Delta \sigma$ according to the Brune model	$\Delta \sigma$ according to the MKS model
20	$\Delta \sigma \ge 10 \text{ MPa}$	$\Delta \sigma \ge 29 \text{ MPa}$
113	$1 \le \Delta \sigma < 10 \text{ MPa}$	$2.9 \le \Delta \sigma < 29 \text{ MPa}$
50	$\Delta \sigma < 1$ MPa	$\Delta \sigma < 2.9 \text{ MPa}$

The matrices of individual mechanisms m_{ij} were summed within each cell to compute the STD in accordance with (8). The STD intensity, I_{Σ} , in the same cell was determined by direct summation of the scalar seismic moments according to (8). The method for the STD intensity computing is described in details in [Sycheva et al., 2009]. To compare the distributions of the stress drop and STD intensity, we use the results from [Sycheva, Mansurov, 2017].

The STD intensity distribution is shown in Figure 13. The maximum of I_{Σ} is $0.18 \cdot 10^{-9}$ year⁻¹. Location of the earthquake epicenters from Table A1, with the stress drop values highlighted in colors, is shown on the same map.

The most part of green and red marks of the events felt into the areas, which are characterized by deformation intensity more than $0.1 \cdot 10^{-9}$ year⁻¹, northern slopes of the eastern part of the Kyrgyz range, Karamoinok range, and Sandyk mountains. "Blue" events are not numerous and are equally located in these areas and outside them.

The absence of "red" events in a zone of maximum intensity $(0.18 \cdot 10^{-9} \text{ year}^{-1})$ can be explained in terms of the trigger effect of an electromagnetic sounding of the crust using the ERGU-600



Figure 13. Field of the seismotectonic deformation intensity (color saturation of a square corresponds to the value of I_s at the nodal point according to the legend) and studied earthquakes location (marked with circles). Unit is 10^{-9} per year. The size of a circle depends on the event energy class, color of a mark depends on the level of $\Delta\sigma$ (Table 6). Squares: yellow – location of Bishkek, crimson – location of the Research station RAS. Red lines are active faults (according to [Rebetskii, Kuzikov, 2016]).

powerful electric current generator (a geophysical installation for electrical exploration located on the territory of the RS RAS) [Bogomolov et al., 2003; Sychev et al., 2010, 2012]. A decrease in the number of events of moderate strength and a weak seismicity increase were noted in the cited works in the vicinity of the primary dipole location (see the crimson square in Figure 13). It is highly probable that in a zone of maximum STD intensity, the stress drop occurs due to weaker seismicity, and therefore there are no conditions for stress concentration from the surface to a depth of 15 km. The issue of seismic manifestations of electromagnetic soundings on the territory of the BGP was considered in details in [Sychev et al., 2010, 2012; Bogomolov, 2013], but these works did not use the data on the stress drop in the earthquake sources.

Conclusion

To analyze the very knotty issue of the presence or absence of correlations between the stress drop in the sources of earthquakes in Northern Eurasia and their energy characteristic (the seismic moment), we used a databank on the dynamic parameters of the earthquake sources with the energy class K = 8.7-14.8, which occurred on the territory of the Bishkek geodynamic polygon during 1998–2017. After the updating with solutions, this bank of dynamic parameters contains values of the angular frequency, spectral density parameter, scalar seismic moment, source radius, stress drop level, seismic energy and specific seismic energy for 183 events. The databank allows application of statistical methods.

Two models were used to compute the source radius – the Brune approach and the improved Madariaga–Kaneko–Shearer model. According to the second model, the estimate of the source radius complies with general physical estimates based on the the geoacoustical paradigm. The level of the stress drop in this model is 2.9 times higher than in the Brune one.

For the earthquakes on the territory of the BGP (Northern Tien Shan), the regression – a powerlaw dependence of the stress drop on the scalar seismic moment, the correlation coefficient being equal 0.74. The main contribution to the correlation is made by seismic events with $M_0 < 3.10^{14}$ N·m (lg $M_0 < 14.5$). For major earthquakes with lg $M_0 \ge 14.5$, the correlation coefficient between the values of $\Delta \sigma$ and M_0 is no more than 2/3, and this makes understandable the results of works, in which no significant correlations were found between the stress drop and the seismic moment (they did not consider relatively weak events). The presence of an increasing dependence of the stress drop and the specific seismic energy on the seismic moment, identified for the BGP, complies with the results on the $e_{\rm PR}(M_0)$ power-law dependence in a number of other regions of Northern Eurasia.

Comparison of the stress drop in the earthquake sources in the studied area and the types of focal mechanisms showed that for events of the same class with a thrust mechanism, the average level of the stress drop is higher than for events of the same class with other focal mechanisms.

The next stage of studies of the stress drop and the specific seismic energy is to involve considerations of the temporal dependence of these parameters on time, and comparison of their variations with the change in seismic activity and the average intensity of seismotectonic deformations. Another problem to be solved is the assessment of the dynamic stress drop, i.e. the $\Delta\sigma(t)$ dependence during seismic slippage along the fault plane.

The Appendix to the article contains the Catalog of dynamic parameters for 183 earthquakes in the Northern Tien Shan (1998–2017).

The catalog will be posted in the electronic version on the web-site of the journal (http://journal.imgg.ru/archive) in Excel.xlsx format, which allows sampling by any criterion.

References

1. Abercrombie R. E., Leary P. **1993.** Source parameters of small earthquakes recorded at 2.5 km depth, Cajon Pass Southern California: implications for earthquake scaling. *Geophysical Research Letters*, 20(14): 1511–1514.

2. Abercrombie R.E., Rice J.R. **2005.** Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening? *Geophysical J. International*, 162: 406–424. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2005.02579.x

3. Aki K., Richards P. **1983.** Kolichestvennaya seysmologiya. Teoriya i metody [Quantitative seismology. Theory and methods]. Moscow: Mir Publ., vol. 1–2, 880 p. (In Russ.).

4. Allmann B.P., Shearer P.M. **2009.** Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 114, B01310. https://doi.org/10.1029/2008JB005821

5. Baltay A., Ide S., Prieto G., Beroza G. **2011.** Variability in earthquake stress drop and apparent stress. *Geophysical Research Letters*, 38(6). https://doi.org/10.1029/2011GL046698

6. Besedina A.N., Kocharyan G.G., Kishkina S.B. **2015.** Effect of deformation properties of discontinuities on sources of mining-induced seismicity in rocks. Part I: In situ observations. *J. of Mining Science*, 51(4): 707–717. https://doi.org/10.1134/s1062739115040078

7. Boatwright J. **1980.** Spectral theory for circular seismic sources: Simple estimates of source dimension dynamic stress drop and radiated energy. *Bull. of the Seismological Society of America*, 70: 1–28.

8. Bogomolov L.M. **2013.** Search for new approaches to explain mechanisms of interrelations between seismicity and electromagnetic effects. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 3: 12–18.

9. Bogomolov L.M., Avagimov A.A., Sycheva N.A., Bragin V.D. et al. **2003.** On the interrelation between week seismicity and sounding electric impacts at Bishkek geodynamic testing place. In: *Problems of destructure earthquake disaster prevention*. Almaty-Evero, 175–183.

10. Bogomolov L.M., Sycheva N.A., Zakupin A.S., Kamenev P.A., Sychev V.N. **2015.** Raspredelenie spada napryazheniy v ochagakh zemletryaseniy i proyavleniya triggernykh effektov [Stress drop distribution in sources of earthquakes and trigger effects manifestation]. In.: *Triggernye effekty v geosistemakh (Moskva, 16–19 yunya 2015 g.): Materialy tret'ego Vserossiyskogo seminara-soveshchaniya* [*Trigger effects in geosystems (Moscow, 16–19 June, 2015): Proceedings of the Third All-Russian workshop-meeting*], IDG RAN [IDG RAS]. Moscow: GEOS, 48–56. (In Russ.).

11. Boore D.M. **2003.** Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3): 635–676. https://doi.org/10.1007/pl00012553

12. Brune J.N. **1970.** Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. J. of Geophysical Research, 75(26): 4997–5009. https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997

13. Brune J.N. **1971.** Corrections. *J. of Geophysical Research*, 76(20): 5002. https://doi.org/10.1029/jb076i020p05002

14. Burymskaya R.N. **2001.** [Radiation spectral content and the source parameters of earthquake in the northwestern Pacific during 1969–1996]. In: A.I. Ivashchenko (ed.). *Dinamika ochagovykh zon i prognozirovanie sil'nykh zemletryaseniy severo-zapada Tikhogo okeana* [Dynamics of source zones and forecast of the string earthquakes in the northwestern Pacific]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN [Institute of Marine Geology and Geophysics], vol. 1: 48–67. (In Russ.).

15. Candela T., Renard F., Bouchon M., Schmittbuhl J., Brodsky E.E. **2011.** Stress drop during earthquakes: effect of fault roughness scaling. *Bull. of the Seismological Society of America*, 101(5): 2369–2387. https://doi.org/10.1785/0120100298

16. Chediya O.K. **1986.** Morfostruktury i noveyshiy tektogenez Tyan'-Shanya [Morphostructures and recent tectogenesis of Tien-Shan]. Frunze: Ilim, 315 p. (In Russ.).

17. Choy G.L., Boatwright J.L. **1995.** Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B9): 18205–18228. https://doi.org/10.1029/95jb01969

18. Choy G.L., McGarr A., Kirby S.H., Boatwright J. **2006.** An overview of the global variability in radiated energy and apparent stress. In: *Earthquakes: radiated energy and the physics of faulting*. AGU, 43–57. https://doi.org/10.1029/170gm06

19. Cotton F., Archuleta R., Causse M. **2013.** What is sigma of the stress drop? *Seismological Research Letters*, 84(1): 42–48. https://doi.org/10.1785/0220120087

20. Dobrynina A.A. **2009.** Source parameters of the earthquakes of the Baikal rift system. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 45(12): 1093–1109. https://doi.org/10.1134/s1069351309120064

21. Domański B., Gibowicz S. **2008.** Comparison of source parameters estimated in the frequency and time domains for seismic events at the Rudna copper mine, Poland. *Acta Geophysica*, 56: 324–343. https://doi.org/10.2478/s11600-008-0014-1

22. Eshelby J.D. **1957.** The determination of elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. *Proceedings of the Royal Society of London*, A241(1226): 376–396. https://doi.org/10.1098/rspa.1957.0133

23. Fehler M.C., Phillips W.S. **1991.** Simultaneous inversion for Q and source parameters of microearthquakes accompanying hydraulic fracturing in granitic rock. *Bull. of the Seismological Society of America*, 81(2): 553–575.

24. Gibowicz S.J., Kijko A. 1994. An introduction to mining seismology. San Diego: Academic Press, 399 p.

25. Gibowicz S., Young R., Talebi S., Rawlence D. **1991.** Source parameters of seismic events at the Underground Research Laboratory in Manitoba, Canada: Scaling relations for events with moment magnitude smaller than 2. *Bull. of the Seismological Society of America*, 81: 1157–1182.

26. Hanks T., Kanamori H. **1979.** A moment magnitude scale. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 84: 2348–2350.

27. Hua W., Chen Z., Zheng S. **2013.** Source parameters and scaling relations for reservoir induced seismicity in the Longtan reservoir area. *Pure and Applied Geophysics*, 170(5): 767–783.

28. Keylis-Borok V.I., Pisarenko V.F., Solov'ev S.L. et al. **1979.** [Mass determination of focal mechanisms of earthquakes on a computer]. In.: *Teoriya i analiz seysmologicheskikh nablyudeniy* [*Theory and analysis of seis-mological observations*]. Moscow: Nauka Publ., 45–59. (Vychislitel'naya seysmologiya [Computational seismology]; vol. 12). (In Russ.).

29. Kocharyan G.G. **2012.** [On radiating efficiency of earthquakes (example of geomechanical interpretation of seismological monitoring data)]. *Dinamicheskie protsessy v geosferakh* [Dynamic processes in the geospheres], 3: 36–47. (In Russ.).

30. Kocharyan G.G. **2014.** Scale effect in seismotectonics. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(2): 353–385. https://doi.org/10.5800/gt-2014-5-2-0133

31. Kocharyan G.G. 2016. Geomechanics of faults. Moscow: GEOS, 424 p. (In Russ.).

32. Kocharyan G.G., Markov V.K., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V. **2014.** Mesomechanics of shear resistance along a filled crack. *Physical Mesomechanics*, 17(2): 123–133.

33. Kocharyan G. G., Ivanchenko G. N., Kishkina S. B. **2016.** Energy radiated by seismic events of different scales and geneses. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 52(4): 606–620. https://doi.org/10.1134/s1069351316040030

34. Kostrov B.V. **1975.** *Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya* [*Mechanics of the source of tec-tonic earthquake*]. Moscow: Nauka, 175 p. (In Russ.).

35. Landau L.D., Livshits E.M. **1988.** [*Theoretical physics*: handbook]. Vol. 6: [*Hydrodynamics*]. 4 ed. Moscow: Nauka, 736 p. (In Russ.).

36. Lukk A.A., Yunga S.L. **1979.** Seysmotektonicheskaya deformatsiya Garmskogo rayona [Seismotectonic deformation of Garm region]. *Izvestiya AN SSSR, Fizika Zemli*, 10: 24–43. (In Russ.).

37. Malovichko A.A., Malovichko D.A. **2010.** [Estimation of power and deformation characteristics of the sources of seismic events]. In.: *Metody i sistemy seysmodeformatsionnogo monitoringa tekhnogennykh zemletry-aseniy i gornykh udarov* [*Methods and systems of seismic deformation monitoring of anthropogenic earthquakes and rock bumps*]. Novosibirsk, vol. 2: 66–92. (In Russ.).

38. Moskvina A.G. **1969a.** [The displacement field of elastic waves formed by propagating dislocation]. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, 6: 3–10. (In Russ.).

39. Moskvina A.G. **1969b.** [Studies of the displacement fields of elastic waves depending on characteristics of earthquake source]. *Izvestiya AN SSSR, Fizika Zemli*, 9: 3–16. (In Russ.).

40. Pustovitenko B.G., Merger E.A., Pustovitenko A.A. **2013.** [Dynamic parameters of the earthquake foci of Crimea according to digital seismic stations]. *Geofizicheskiy Zhurnal* = *Geophysical Journal*, 5: 172–186. (In Russ.).

41. Rautian T.G., Khalturin V.I. **1991.** [Focal spectra of earthquakes]. In.: Zemletryaseniya i protsessy ikh podgotovki [Earthquakes and their processes of their preparation]. Moscow: Nauka, 82–93.

42. Rebetsky Y.L., Kuzikov S.I. **2016.** Active faults of the Northern Tien Shan: tectonophysical zoning of seismic risk. *Russian Geology and Geophysics*, 57(6): 967–983. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.05.004

43. Riznichenko Yu.V. **1985.** *Problemy seysmologii*: Izbrannye trudy [*Problems of seismology*: Selected papers]. Moscow: Nauka, 408 p.

44. Rodkin M.V. **2001a.** [The problem of the earthquake source physics: models and contradictions]. *Fizika* Zemli = Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 8: 42–52.

45. Rodkin M.V. **2001b**. [Statistics of apparent stresses in relation to the origin of an earthquake source]. *Fizika Zemli = Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 8: 53–63.

46. Sychev V.N., Bogomolov L.M., Rybin A.K., Sycheva N.A. **2010.** [The influence of electromagnetic soundings of the crust on the seismic regime of the territory of Bishkek geodynamic test site]. In: *Triggernye effekty v geo*sistemakh: Materialy Vseros. seminara-soveshch., Moskva, 22–24 iyunya 2010 goda [Trigger effects in geosystems: Proceedings of All-Russian workshop-meeting, Moscow, 22–24 June, 2010]. Moscow: GEOS, 316–326.

47. Sychev V.N., Bogomolov L.M., Sycheva N.A. **2012.** [On the question of statistical reliability of seismic response by experimental soundings of the earth's crust at the Bishkek geodynamic test site]. In.: *Pyatyy Mezhdunarodnyy simpozium*, 19–24 iyunya, 2011 goda «Sovremennye problemy geodinamiki i geoekologii vnutrikontinental'nykh orogenov» [Proceedings of the 5th International Symposium "Modern problems of geodynamics and geoecology of intracontinental orogens", 19–24 June, 2011]. Bishkek, vol. 1: 273–280.

48. Sycheva N.A. **2016.** [Kyrgyz seismological network KNET]. *Vestnik KRSU* [*Bulletin of KRSU*], 16(5): 175–183.

49. Sycheva N.A. **2020.** Seismic momeDint tensor and dynamic parameters of earthquakes in the Central Tien Shan: translation. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 178–209. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.178-191.192-209 50. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. **2014.** Stress drop in the sources of intermediate-magnitude earthquakes in northern Tien Shan. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 50(3): 415–426. https://doi.org/10.1134/s1069351314030112

51. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. **2016.** Patterns of stress drop in earthquakes of the Northern Tien Shan. *Russian Geology and Geophysics*, 57(11): 1635–1645. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.009

52. Sycheva N.A., Mansurov A.N. **2017.** Comparison of crustal deformation rates estimated from seismic and GPS data on the Bishkek Geodynamic Polygon. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 809–825. https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0318

53. Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Mukhamadeeva V.A., Yunga S.L. **2005.** Determination of seismotectonic crustal strains in the North Tien Shan using focal mechanisms from data of the KNET digital seismic network. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 41(11): 916–930.

54. Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Sychev V.N., Kostuk A.D. **2009.** Intensity of seismotectonic deformations as the indicator of dynamic processes in earth crust (on Tien-Shan example). *Geofizicheskie issledovaniya* [*Geophysical research*], 10(2): 37–46. (In Russ.).

55. Ide S., Beroza G.C., Prejean S.G., Ellsworth W.L. **2003.** Apparent break in earthquake scaling due to path and site effects on deep borehole recordings. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B5): 2271. https://doi.org/10.1029/2001JB001617

56. Kanamori H. **1977.** The Energy Release in Great Earthquakes. J. of Geophysical Research, 82(20): 2981–2987. https://doi.org/10.1029/jb082i020p02981

57. Kaneko Y, Shearer P.M. **2014.** Seismic source spectra and estimated stress drop derived from cohesivezone models of circular subshear rupture. *Geophysical J. International*, 197(2): 1002–1015. https://doi.org/10.1093/gji/ggu030

58. Kwiatek G., Ben-Zion Y. **2013.** Assessment of P and S wave energy radiated from very small shear-tensile seismic events in a deep South African mine. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(7): 3630–3641. https://doi.org/10.1002/jgrb.50274

59. Kwiatek G., Plenkers K., Dresen G. et al. **2011.** Source parameters of picoseismicity recorded at Mponeng deep gold mine, South Africa: implications for scaling relations. *Bull. of the Seismological Society of America*, 101(6): 2592–2608. https://doi.org/10.1785/0120110094

60. Lancieri M., Madariaga R., Bonilla F. **2012.** Spectral scaling of the aftershocks of the Tocopilla 2007 earthquake in northern Chile. *Geophysical J. International*, 189: 469–480. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05327.x

61. Ling R.F. **1972.** On the theory and construction of k-clusters. *The Computer J.*, 15(4): 326–332. doi:10.1093/comjnl/15.4.326

62. Madariaga R. **1976.** Dynamics of an expanding circular fault. *Bull. of the Seismological Society of America*, 66: 639–666.

63. Madariaga R. **1979.** On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity. *J. of Geophysical Research*, 84: 2243–2250. https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02243

64. Madariaga R. **2011.** Earthquake scaling laws. In: R.A. Meyers, ed. *Extreme environmental events: Complexity in forecasting and early warning*. Springer, 364–383. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6_22

65. McGarr A. **1993.** Factors influencing the strong ground motion from mining-induced tremors. In: R.P. Young, ed. *Rockbursts and seismicity in mines*. Rotterdam, 3–12.

66. McGarr A. **1994.** Some comparisons between mining-induced and laboratory earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 142: 467–489.

67. Mori J., Abercrombie R.E., Kanamori H. **2003.** Stress drops and radiated energies of aftershocks of the 1994 Northridge, California, earthquake. *J. of Geophysical Research*, 108(B11): 2545–2556. https://doi.org/10.1029/2001jb000474

68. Oth A., Parolai S., Bindi D., Wenz F. **2009.** Source spectra and site response from S-waves of intermediate-depth Vrancea, Romania, earthquakes. *Bull. of the Seismological Society of America*, 99(1): 235–254. https://doi.org/10.1785/0120080059

69. Oye V., Bungum H., Roth M. **2005.** Source parameters and scaling relations for mining-related seismicity within the Pyhäsalmi Ore Mine, Finland. *Bull. of the Seismological Society of America*, 95(3): 1011–1026. http://dx.doi.org/10.1785/0120040170

70. Pacor F., Spallarossa D., Oth A., Luzi L., Puglia R., Cantore L., Mercuri A., D'Amico M., Bindi D. **2016.** Spectral models for ground motion prediction in the L'Aquila region (central Italy): evidence for stress-drop dependence on magnitude and depth. *Geophysical J. International*, 204(2): 697–718. https://doi.org/10.1093/gji/ggv448

71. Parolai S., Bindi D., Durukal E., Grosser H., Milkereit C. **2007.** Source parameters and seismic moment-magnitude scaling for Northwestern Turkey. *Bull. of the Seismological Society of America*, 97(2): 655–660. https://doi.org/10.1785/0120060180 72. Roecker S.W., Sabitova T.M., Vinnik L.P., Burmakov Y.A., Golvanov M.I., Mamatkanova R., Munirova L. **1993.** Three-dimensional elastic wave velocity structure of the Western and Central Tien-Shan. *J. of Geophysical Research*, 98(B9): 15779–15795. https://doi.org/10.1029/93jb01560

73. Ruff L.J. **1999.** Dynamic stress drop of recent earthquakes: Variations within subduction zones. *Pure and Applied Geophysics*, 154: 409–431. https://doi.org/10.1007/s000240050237

74. Safonov D.A., Nagornykh T.V., Konovalov A.V., Stepnov A.A. **2017.** The moment tensors, focal mechanisms, and stresses on Sakhalin Island. *J. of Volcanology and Seismology*, 11(3): 225–234. https://doi.org/10.1134/S0742046317030058

75. Sander J., Ester M., Kriegel H., Xu X. **1998.** Density-Based Clustering in Spatial Databases: The Algorithm GDBSCAN and its applications. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2): 169–194. https://doi.org/10.1023/A:1009745219419

76. Sato T., Hirasawa T. **1973.** Body wave spectra from propagating shear cracks. *J. of Physics of the Earth*, 21: 415–431. https://doi.org/10.4294/jpe1952.21.415

77. Shaw B.E., Richards-Dinger K., Dieterich J.H. **2015.** Deterministic model of earthquake clustering shows reduced stress drops for nearby aftershocks. *Geophysical Research Letters*, 42: 9231–9238. https://doi.org/10.1002/2015gl066082

78. Scholz C.H. **2002.** *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 496 p. https://doi.org/10.1017/cbo9780511818516

79. Scholz C.H. **2019.** *The mechanics of earthquakes and faulting*. 3rded. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 519 p. https://doi.org/10.1017/9781316681473

80. Scuderi M.M., Marone C., Tinti E., Di Stefano G., Collettini C. **2016.** Precursory changes in seismic velocity for the spectrum of earthquake failure modes. *Nature Geoscience*, 9(9): 695–700. https://doi.org/10.1038/ngeo2775

81. Tomic J., Abercrombie R.E., Do Nascimento A.F. **2009.** Source parameters and rupture velocity of small $M \le 2.1$ reservoir induced earthquakes. *Geophysical J. International*, 179: 1013–1023. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2009.04233.x

82. Urbancic T.I., Young R.P. **1993.** Space-time variations in source parameters of mining-induced seismic events with M<0. *Bull. of the Seismological Society of America*, 83: 378–397.

83. Yamada T., Mori J.J., Ide S., Abercrombie R.E., Kawakata H., Nakatani M., Iio Y., Ogasawara H. **2007.** Stress drops and radiated seismic energies of microearthquakes in a South African gold mine. *J. of Geophysical Research*, 112, B03305. doi:10.1029/2006JB004553

84. Yunga S.L. **1990.** Metody i rezul'taty izucheniya seysmotektonicheskikh deformatsiy [Methods and results of studies of seismotectonic deformations]. Moscow: Nauka, 191 p. (In Russ.).

About the Authors

BOGOMOLOV Leonid Mikhailovich (ORCID 0000-0002-9124-9797), Doctor Sci. in Phys. and Math., Director, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, bleom@mail.ru SYCHEVA Nailia Abdullovna (ORCID 0000-0003-0386-3752), Cand. Sci. in Phys. and Math., senior researcher of GPS Laboratory, Research Station RAS in Bishkek, Kyrgyzstan, nelya@gdirc.ru
	\sim
٠	
-	d
	S.
	U
	പ
	Q

Геосистемы переходных зон

2020, 4 (4): 393-446

Таблица ПІ. Каталог динамических параметров землетрясений на территории Северного Тянь-Шаня Table AI. The catalog of dynamic parameters of the earthquakes in the Northern Tien Shan (1998–2017)

The table presents: date and time of event, hypocenter coordinates (φ – latitude, λ – longitude), H – depth, K – energy class, M – magnitude, f_0 – angular frequency, Ω_0 – spectral density, M_0 – scalar seismic moment, r – source radius, $\Delta\sigma$ – stress drop, $E_{\rm s}$ – seismic energy, $e_{\rm pr}$ – specific seismic energy. The types of focal mechanisms: TH – thrust, TH-S – thrust-shift, NF – normal fault, NF-S – normal fault with the strike-slip component, SH – horizontal shift, SV – vertical shift. Dash means that type is not identified.

В таблице представлены: дата, время события, координаты гипоцентра (φ – широта, λ – долгота), H – глубина, K – энергетический класс, M – магнитуда, f₀ – угловая частота, Ω₀ – спектральная плотность, M₀ – скалярный сейсмический момент, *r* – радиус очага, Δσ – сброшенные напряжения, E_s – сейсмическая энергия, e_{pk} – приведенная сейсмическая энергия. Тип фокального механизма: B3 – взброс, B3-C – взбросо-сдвиг, C5 – сброс, C5-C – сбросо-сдвиг, C7 – сдвиг горизонтальный, CB – сдвиг вертикальный. Прочерк – тип не определен.

No	Date	Time	Coord	inates	H,	K	M	$f_0,$	$\Omega_0, 10^{-5}$	$M_{0,10^{14}}$	k = (Brune	0.37 model)	$\frac{k=0}{\text{(Mads)}}$).26 uriaga lel)	$E_{\rm s},$	e _{PR}	Type of focal
			φ	٧°	KIII			Hz	s.m	N.m	r _B , m	$\Delta\sigma,$ MPa	r _w , m	$\Delta\sigma,$ MPa	10'J	10-2	шеспашып
1	2	3	4	5	9	7	~	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18
-	26.08.1998	22:50:27.42	42.28	7.01	18.16	9.74	3.19	5.20	1.72	0.40	251	1.11	175	3.27	0.33	0.88	B3 (TH)
7	02.11.1998	00:57:37.10	42.10	75.08	15.64	11.53	4.18	3.19	16.80	3.92	409	2.51	285	7.39	7.31	1.98	B3 (TH)
ω	21.11.1998	11:46:09.44	42.24	74.06	20.81	12.50	4.72	2.00	147.00	34.40	652	5.44	455	15.99	138.95	4.28	B3 (TH)
4	24.05.1999	07:39:21.39	42.66	75.04	6.78	10.65	3.69	4.90	5.42	1.27	266	2.94	186	8.64	2.76	2.31	B3 (TH)
S	15.06.1999	07:32:03.52	42.66	75.03	6.98	10.30	3.50	4.50	5.33	1.24	290	2.24	202	6.58	2.06	1.76	B3-C (TH-S)
9	13.07.1999	00:40:40.99	42.14	73.68	13.42	99.66	3.14	5.80	3.64	0.85	225	3.28	157	9.63	2.07	2.58	I
2	14.01.2000	13:27:43.37	42.07	75.74	4.09	9.85	3.25	6.00	2.09	0.49	217	2.08	152	6.11	0.75	1.64	B3-C (TH-S)
8	28.07.2000	17:41:28.00	42.58	74.79	16.5	9.52	3.07	5.22	1.14	0.27	250	0.75	174	2.20	0.15	0.59	B3-C (TH-S)
6	01.08.2000	18:48:51.00	42.10	75.09	16.4	10.1	3.39	4.50	4.64	1.08	290	1.95	202	5.74	1.57	1.54	CT (SH)
10	22.10.2000	00:54:20.68	42.12	75.02	7.06	10.62	3.68	4.30	12.50	2.92	303	4.59	212	13.48	9.94	3.61	B3 (TH)
11	14.12.2000	21:34:25.04	42.63	74.87	12.81	9.61	3.12	5.00	1.64	0.38	261	0.94	182	2.78	0.27	0.74	B3 (TH)
12	14.12.2000	23:47:48.30	42.63	74.87	12.7	10.2	3.44	5.40	1.30	0.31	241	0.95	169	2.78	0.21	0.75	B3 (TH)
13	19.12.2000	07:03:05.20	42.25	74.10	13.2	8.94	2.74	5.68	0.26	0.06	229	0.22	160	0.65	0.01	0.18	CT (SH)
14	21.02.2001	12:15:16.40	42.74	75.00	1.7	11.7	4.28	2.50	15.00	3.49	521	1.08	364	3.17	2.79	0.85	B3 (TH)
15	22.05.2001	15:02:33.60	42.15	76.18	13.2	12.06	4.48	2.70	350.00	81.70	483	31.76	337	93.35	1923.56	25.00	B3-C (TH-S)
16	08.07.2001	11:51:52.70	42.14	74.98	14.1	11.18	3.99	4.44	10.60	2.47	294	4.27	205	12.55	7.82	3.36	B3-C (TH-S)
17	20.08.2001	01:27:05.70	42.14	74.98	6.9	10.47	3.59	4.15	8.80	2.05	314	2.90	219	8.53	4.42	2.28	B3 (TH)

Приложение

18	B3-C (TH-S)	I	B3 (TH)	B3 (TH)	I	B3-C (TH-S)	B3 (TH)	I	CB-C (NF-S)	B3 (TH)	CT (SH)	CT (SH)	Ι	B3-C (TH-S)	CT (SH)	CT (SH)	CT (SH)	CT (SH)	B3-C (TH-S)	CT (SH)	I	B3-C (TH-S)	B3 (TH)	B3 (TH)	B3-C (TH-S)	CT (SH)	CT (SH)	CB (SV)	CT (SH)	B3 (TH)
17	16.64	0.45	33.39	0.62	32.25	4.71	0.98	1.34	1.26	0.43	0.58	5.32	0.46	0.84	0.35	1.24	0.34	8.24	0.92	3.09	0.38	0.41	14.68	1.35	1.50	1.06	0.35	0.33	1.63	12.97
16	151.72	0.13	945.19	0.14	1469.25	10.75	0.41	1.19	0.68	0.07	0.16	12.04	0.07	0.23	0.05	0.56	0.05	57.54	0.36	4.62	0.05	0.06	835.80	1.00	1.83	0.55	0.05	0.04	1.28	957.40
15	62.14	1.67	124.69	2.31	120.41	17.59	3.67	5.00	4.71	1.60	2.16	19.85	1.71	3.14	1.31	4.64	1.26	30.76	3.42	11.53	1.42	1.53	54.82	5.04	5.59	3.96	1.31	1.24	6.07	48.44
14	190	200	219	165	260	182	173	202	175	172	182	174	158	158	172	165	178	219	174	182	163	163	364	190	217	182	169	160	182	414
13	21.14	0.57	42.43	0.79	40.97	5.98	1.25	1.70	1.60	0.54	0.74	6.75	0.58	1.07	0.44	1.58	0.43	10.47	1.16	3.92	0.48	0.52	18.65	1.72	1.90	1.35	0.45	0.42	2.07	16.48
12	272	286	314	237	372	261	248	290	251	246	261	250	227	227	246	237	256	314	250	261	233	233	521	272	310	261	243	229	261	592
11	9.68	0.30	30.00	0.24	48.40	2.42	0.44	0.95	0.58	0.19	0.30	2.40	0.16	0.29	0.15	0.48	0.16	7.41	0.41	1.59	0.14	0.15	60.40	0.79	1.30	0.55	0.15	0.12	0.84	78.40
10	41.50	1.30	129.00	1.03	207.00	10.40	1.87	4.05	2.47	0.79	1.28	10.30	0.66	1.22	0.65	2.06	0.70	31.80	1.77	6.80	0.60	0.64	259.00	3.36	5.57	2.34	0.63	0.49	3.58	336.00
6	4.80	4.56	4.15	5.50	3.50	5.00	5.25	4.50	5.20	5.30	5.00	5.22	5.75	5.75	5.30	5.50	5.10	4.15	5.22	5.00	5.60	5.60	2.50	4.80	4.20	5.00	5.37	5.70	5.00	2.20
8	3.82	2.73	4.81	3.01	5.01	3.87	3.17	3.45	3.39	3.22	3.04	4.26	3.03	3.01	3.22	3.26	3.13	4.42	3.12	3.56	2.82	3.18	5.38	3.59	4.03	3.48	2.87	2.96	3.47	5.14
2	10.88	8.92	12.65	9.41	13.01	10.97	9.71	10.21	10.1	9.79	9.48	11.66	9.46	9.41	9.79	9.87	9.63	11.95	9.62	10.41	9.07	9.73	13.68	10.47	11.26	10.27	9.17	9.32	10.24	13.25
9	6.3	11.2	6.5	11.9	19.6	7.9	15.84	10.7	14.0	16.7	13.6	13.1	16.9	12.9	20.5	10.51	16.5	16.4	16.9	6.3	15.2	14.7	14.0	19.08	6.62	19.7	14.7	9.11	12.57	17.9
5	75.59	73.58	74.14	75.48	74.55	73.75	75.66	74.60	74.44	74.94	73.86	74.47	75.22	75.17	74.35	75.49	74.23	74.48	75.21	73.99	73.98	74.94	75.30	75.28	74.28	74.90	73.82	74.87	74.62	74.92
4	42.41	42.15	42.59	42.57	42.21	42.14	42.05	43.20	42.54	42.58	42.68	42.53	43.22	42.12	42.69	42.11	42.37	42.50	42.04	42.42	42.42	42.70	42.55	42.55	42.83	42.74	42.09	42.67	42.61	42.28
3	07:13:42.80	15:38:11.00	01:28:55.40	15:05:56.70	15:35:06.90	21:03:48.00	17:00:03.65	23:06:11.20	22:00:59.40	14:21:07.60	21:15:53.20	10:35:22.20	13:45:28.00	20:41:32.90	10:30:14.40	10:17:01.84	01:51:17.90	16:42:13.90	05:09:50.30	22:44:35.90	05:54:44.10	06:20:04.80	09:06:17.90	13:26:34.98	19:48:15.44	02:01:08.30	00:28:54.30	16:39:34.50	22:37:09.42	17:15:10.80
2	11.09.2001	13.09.2001	18.11.2001	15.02.2002	10.05.2002	17.06.2002	08.10.2002	12.11.2002	08.12.2002	11.12.2002	26.01.2003	21.02.2003	04.06.2003	23.06.2003	02.07.2003	15.07.2003	24.09.2003	06.10.2003	12.11.2003	11.12.2003	12.12.2003	16.01.2004	16.01.2004	18.01.2004	04.02.2004	13.02.2004	04.03.2004	23.04.2004	13.05.2004	02.06.2004
-	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	4	45	46	47

Type of focal	mechanism	18	B3 (TH)	B3 (TH)	CT (SH)	B3-C (TH-S)	CT (SH)	B3 (TH)	Ι	B3 (TH)	B3 (TH)	CT (SH)	CB-C (NF-S)	B3-C (TH-S)	I	CT (SH)	Ι	B3-C (TH-S)	CB	I	B3 (TH)	I	CT (SH)	I				
$e_{_{ m PR}}$	10-5	17	0.81	1.34	0.57	2.60	1.27	2.77	2.60	0.91	18.03	0.33	0.36	4.89	3.07	0.82	0.85	5.25	2.70	0.43	0.74	0.68	3.40	0.27	1.07	1.99	0.41	2.51
$E_{\rm s},$	10 ⁹ J	16	0.32	1.20	0.14	4.21	3.99	5.10	3.27	0.36	897.23	0.04	0.10	22.64	71.31	0.63	0.31	16.93	5.55	0.10	0.34	0.15	5.60	0.03	0.50	1.61	0.08	3.06
).26 uriaga lel)	$\Delta\sigma$, $\Delta \sigma$, MPa	15	3.03	5.01	2.12	9.71	4.73	10.34	9.70	3.40	67.33	1.22	1.33	18.26	11.46	3.06	3.16	19.60	10.08	1.61	2.77	2.54	12.69	1.02	4.01	7.43	1.54	9.39
k = 0 (Mada moć	r _w , m	14	182	202	175	198	314	202	182	175	325	172	217	228	455	228	175	197	212	190	198	160	182	175	175	172	182	182
).37 model)	Δσ, MPa	13	1.03	1.71	0.72	3.30	1.61	3.52	3.30	1.16	22.91	0.42	0.45	6.21	3.90	1.04	1.07	6.67	3.43	0.55	0.94	0.87	4.32	0.35	1.37	2.53	0.52	3.19
k = (Brune	<i>r</i> _B , m	12	261	290	251	283	449	290	261	251	466	246	310	326	652	326	251	282	303	272	283	229	261	251	251	246	261	261
$M_{0,} 10^{14}$	u. N	11	0.42	0.95	0.26	1.72	3.34	1.95	1.34	0.42	52.80	0.14	0.31	4.91	24.70	0.82	0.39	3.42	2.18	0.25	0.49	0.24	1.75	0.13	0.49	0.86	0.21	1.29
$\Omega_0, 10^{-5}$	s.m	10	1.79	4.06	1.11	7.36	14.30	8.37	5.73	1.78	226.00	0.61	1.33	21.10	106.00	3.52	1.66	14.70	9.35	1.07	2.10	1.01	7.49	0.54	2.11	3.68	0.91	5.54
$f_0,$	Hz	6	5.00	4.50	5.20	4.60	2.90	4.50	5.00	5.20	2.80	5.30	4.20	4.00	2.00	4.00	5.20	4.62	4.30	4.80	4.60	5.70	5.00	5.20	5.20	5.30	5.00	5.00
M		8	3.17	3.65	2.71	3.68	4.42	3.83	3.77	3.75	4.63	2.98	3.03	4.22	4.40	3.62	2.92	3.87	3.11	2.99	3.32	3.04	3.04	2.99	3.43	3.11	2.88	3.22
×	1	7	9.71	10.57	8.87	10.63	11.95	10.89	10.78	10.75	12.34	9.36	9.45	11.6	11.92	10.51	9.26	10.97	9.6	9.39	9.97	9.47	9.47	9.39	10.18	9.59	9.18	9.80
H,	КШ	9	20.2	15.3	8.5	17.2	23.3	11.9	11.0	11.9	6.8	11.0	6.4	6.16	12.5	6.4	12.3	22.2	17.0	13.3	0.0	6.8	11.1	12.0	10.2	12.88	7.0	9.47
inates	٧°	5	75.23	74.84	75.27	75.09	74.38	74.84	74.82	74.82	76.05	74.83	73.62	75.89	75.41	75.40	75.40	75.25	76.42	73.80	73.64	74.80	75.85	73.68	75.11	73.68	75.43	73.64
Coord	°	4	42.54	42.62	42.03	42.16	42.77	42.66	42.65	42.65	42.10	42.66	42.18	42.71	42.69	42.69	42.68	42.60	42.26	42.12	42.21	42.27	42.76	42.33	42.60	42.16	42.10	42.17
Time		3	14:25:22.80	12:42:54.30	17:44:21.80	21:05:21.40	14:25:01.50	19:22:05.40	21:00:07.50	09:28:26.20	06:25:58.90	06:49:52.70	00:49:45.70	00:55:30.54	01:52:48.30	08:50:32.80	01:07:54.90	08:56:53.90	12:01:38.70	23:11:05.80	03:23:55.40	06:38:51.90	10:09:30.90	20:24:33.50	18:58:22.90	02:32:07.82	06:36:45.60	23:43:30.68
Date		2	20.09.2004	27.11.2004	10.05.2005	08.06.2005	20.06.2005	07.07.2005	07.07.2005	03.10.2005	08.10.2005	12.11.2005	23.11.2005	27.12.2005	28.12.2005	29.12.2005	30.12.2005	01.01.2006	13.01.2006	25.01.2006	28.05.2006	12.07.2006	13.07.2006	20.07.2006	15.08.2006	09.09.2006	28.10.2006	05.11.2006
Ŋ			48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	99	67	68	69	70	71	72	73

-	2	.0	4	5	9	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18
74	08.11.2006	02:21:26.90	42.57	75.36	18.6	13.37	5.21	2.00	411.00	96.00	652	15.18	455	44.61	1080.73	11.95	B3 (TH)
75	08.11.2006	02:26:50.84	42.57	75.35	20.10	10.94	3.86	5.00	1.02	0.24	261	0.59	182	1.73	0.10	0.46	B3 (TH)
76	17.11.2006	19:47:58.30	42.57	75.35	12.9	10.06	3.37	5.20	1.88	0.44	251	1.22	175	3.57	0.39	0.96	CT (SH)
77	25.12.2006	20:00:58.30	42.11	76.03	0.1	14.83	6.02	1.70	9490.00	2210.00	767	214.93	535	631.66	352885.06	169.18	B3 (TH)
78	25.12.2006	20:21:16.70	42.14	75.99	1.1	10.3	3.50	5.00	7.68	1.79	261	4.43	182	13.02	5.89	3.49	B3 (TH)
79	28.12.2006	02:04:46.80	42.54	74.44	13.4	9.59	3.11	5.30	1.09	0.26	246	0.75	172	2.20	0.14	0.59	CT (SH)
80	08.04.2007	02:15:35.30	42.57	75.36	18.5	9.24	2.91	4.50	0.89	0.21	290	0.38	202	1.10	0.06	0.30	B3-C (TH-S)
81	06.06.2007	11:09:25.60	42.57	75.40	13.0	13.25	5.14	1.90	356.00	83.00	686	11.25	479	33.06	692.54	8.86	B3 (TH)
82	07.06.2007	17:50:10.30	42.58	75.40	19.9	69.6	3.16	4.65	1.12	0.26	280	0.52	196	1.53	0.10	0.41	B3-C (TH-S)
83	07.07.2007	15:35:00.60	42.57	74.61	11.4	9.47	3.04	4.14	2.22	0.52	315	0.73	220	2.13	0.28	0.57	I
84	06.10.2007	23:56:47.90	42.47	74.42	6.7	10.21	3.45	4.73	3.67	0.86	276	1.79	192	5.26	1.14	1.41	CE (NF)
85	21.10.2007	14:08:44.40	42.57	75.35	13.6	10.96	3.87	4.24	11.30	2.65	307	3.99	215	11.72	7.83	3.14	B3-C (TH-S)
86	16.12.2007	09:10:41.00	41.83	74.33	17.2	9.37	2.98	5.00	3.14	0.73	261	1.81	182	5.33	0.99	1.43	I
87	08.01.2008	18:04:13.80	42.05	75.20	16.8	11	3.89	3.99	40.30	9.41	327	11.81	228	34.70	82.37	9.29	CT (SH)
88	05.02.2008	09:24:12.30	42.28	74.96	6.2	99.66	3.14	5.00	1.08	0.25	261	0.62	182	1.83	0.12	0.49	B3 (TH)
89	24.02.2008	21:02:11.90	42.53	75.44	22.1	9.53	3.07	5.20	1.10	0.26	251	0.72	175	2.10	0.14	0.56	B3 (TH)
90	07.04.2008	06:42:29.00	41.88	73.83	6.5	8.71	2.62	5.00	1.52	0.35	261	0.87	182	2.57	0.23	0.69	Ι
91	04.07.2008	22:09:56.50	42.95	75.40	11.6	10.83	3.79	4.73	14.20	3.31	276	6.91	192	20.32	16.95	5.44	I
92	21.08.2008	17:19:51.80	41.97	76.02	14.2	11.78	4.32	2.8	150.00	35.00	466	15.17	325	44.58	393.38	11.94	B3 (TH)
93	13.09.2008	13:40:29.10	42.52	74.56	11.9	9.84	3.24	5.00	1.61	0.38	261	0.93	182	2.72	0.26	0.73	CT (SH)
94	13.09.2008	18:18:41.90	42.52	74.57	11.4	10.11	3.39	5.10	1.04	0.24	256	0.64	178	1.88	0.12	0.50	CE-C (NF-S)
95	20.09.2008	04:10:44.70	42.00	75.17	18.8	9.19	2.88	4.20	2.81	0.66	310	0.96	217	2.83	0.47	0.76	CT (SH)
96	20.09.2008	04:15:52.70	42.27	74.84	21.7	10.6	3.67	5.60	3.09	0.72	233	2.51	163	7.36	1.34	1.97	Ι
97	29.09.2008	04:38:11.20	42.08	75.40	10.7	9.47	3.04	5.70	1.56	0.36	229	1.33	160	3.91	0.36	1.05	CT (SH)
98	29.11.2008	15:15:35.10	42.53	75.19	14.6	9.13	2.85	5.20	0.78	0.18	251	0.51	175	1.49	0.07	0.40	B3 (TH)
66	22.01.2009	12:55:14.20	42.61	74.49	16.9	9.86	3.26	5.20	0.83	0.19	251	0.54	175	1.58	0.08	0.42	B3 (TH)
100	01.02.2009	11:25:38.00	42.75	73.86	14.9	12.29	4.61	3.00	49.60	11.60	434	6.18	303	18.15	53.03	4.86	B3-C (TH-S)
101	26.02.2009	22:48:10.60	42.27	74.78	16.9	9.78	3.21	5.50	1.60	0.37	237	1.23	165	3.61	0.34	0.97	B3 (TH)
102	09.05.2009	05:36:34.50	42.59	75.11	14.5	9.59	3.11	6.00	1.19	0.28	217	1.19	152	3.49	0.24	0.93	CT (SH)
103	16.05.2009	05:38:46.20	42.59	74.19	6.0	10.1	3.39	5.00	1.76	0.41	261	1.02	182	2.99	0.31	0.80	B3-C (TH-S)

Type of focal	mechanism	18	CT (SH)	I	CT (SH)	B3 (TH)	CT (SH)	CT (SH)	B3 (TH)	B3 (TH)	B3 (TH)	B3 (TH)	B3-C (TH-S)	B3 (TH)	CB-C (NF-S)	B3-C (TH-S)	CB-C (NF-S)	CT (SH)	CT (SH)	CT (SH)	CT (SH)	CB-C (NF-S)	B3-C (TH-S)	B3 (TH)	Ι	CB (SV)	B3-C (TH-S)	B3 (TH)
$e_{_{ m PR}}$	10 ⁻⁵	17	1.93	0.31	0.39	0.46	2.57	0.45	0.69	5.83	0.90	8.89	0.97	1.13	29.25	0.60	0.40	0.96	4.88	0.93	5.06	2.37	1.41	12.76	0.96	5.79	2.18	0.68
$E_{\rm s},$	$10^{9} J$	16	2.77	0.03	0.04	0.06	4.69	0.09	0.23	57.32	0.33	230.30	0.29	0.62	7556.06	0.11	0.09	0.35	9.16	0.24	99.35	13.91	0.77	811.27	0.45	92.65	1.94	0.22
).26 ariaga del)	Δσ, MPa	15	7.22	1.15	1.46	1.73	9.59	1.69	2.58	21.77	3.34	33.20	3.61	4.23	109.21	2.24	1.50	3.57	18.22	3.47	18.90	8.84	5.28	47.66	3.59	21.63	8.15	2.53
k = 0 (Madz moo	r _w m	14	210	156	152	154	207	178	182	276	172	331	157	182	479	157	190	168	169	152	364	314	169	396	182	325	172	182
).37 model)	$\overset{\Delta\sigma,}{MPa}$	13	2.46	0.39	0.50	0.59	3.26	0.57	0.88	7.41	1.14	11.30	1.23	1.44	37.16	0.76	0.51	1.21	6.20	1.18	6.43	3.01	1.80	16.22	1.22	7.36	2.77	0.86
k = (Brune	r _B , m	12	300	223	217	221	296	256	261	395	246	474	225	261	686	225	272	240	241	217	521	449	241	567	261	466	246	261
$M_{0,} 10^{14}$	н. Х.	11	1.52	0.10	0.12	0.15	1.94	0.22	0.36	10.40	0.39	27.50	0.32	0.58	274.00	0.20	0.23	0.39	1.99	0.28	20.80	6.24	0.58	67.50	0.49	17.00	0.94	0.35
$\Omega_0, 10^{-5}$	s.m	10	6.51	0.43	0.50	0.62	8.30	0.94	1.52	44.70	1.66	118.00	1.36	2.50	1170.00	0.85	1.00	1.65	8.54	1.18	89.20	26.70	2.47	289.00	2.12	72.70	4.04	1.49
$f_0,$	Hz	6	4.34	5.84	6.00	5.90	4.40	5.10	5.00	3.30	5.30	2.75	5.80	5.00	1.90	5.80	4.80	5.42	5.40	6.00	2.50	2.90	5.40	2.30	5.00	2.80	5.30	5.00
M	1	~	3.63	2.95	2.83	2.95	3.59	2.76	3.17	4.33	2.91	4.27	3.26	3.48	5.19	3.06	3.86	3.18	3.91	3.24	4.99	3.98	3.47	5.11	3.31	3.73	3.44	3.11
×	1	7	10.54	9.31	9.09	9.31	10.46	8.96	9.71	11.80	9.23	11.69	9.87	10.26	13.34	9.50	10.95	9.72	11.04	9.84	12.98	11.17	10.25	13.2	9.95	10.72	10.2	9.59
,H,	km	9	12.6	4.1	6.7	16.2	12.12	11.9	10.4	5.58	20.5	20.1	20.3	13.93	19.3	22.42	19.85	7.0	18.8	6.9	17.1	16.9	6.4	6.3	18.8	0.1	13.21	15.0
inates	۶	5	74.60	73.99	73.99	74.69	75.71	74.25	74.73	75.73	75.26	74.97	74.85	75.73	75.66	75.65	75.65	74.11	75.15	74.70	74.92	74.92	74.83	74.83	74.89	76.26	75.88	74.57
Coord	φ	4	42.61	42.18	42.16	42.21	42.59	42.40	42.68	42.00	42.58	43.14	42.29	42.60	42.43	42.43	42.44	42.21	42.31	42.54	43.01	43.01	42.04	42.05	42.86	42.52	42.30	42.94
Time		e	00:08:40.90	10:02:30.30	15:33:14.40	00:14:32.30	14:57:10.42	18:44:13.20	09:21:48.60	04:32:46.39	08:25:19.80	06:25:45.80	15:42:18.00	16:16:03.28	01:55:36.00	02:49:01.06	04:17:40.13	15:29:36.20	18:31:50.40	19:12:48.90	09:36:26.80	20:19:43.60	02:28:49.30	12:30:25.50	02:32:41.60	00:24:02.60	03:14:40.13	06:49:17.10
Date	3	2	24.05.2009	25.06.2009	28.06.2009	18.07.2009	25.07.2009	30.07.2009	31.07.2009	07.08.2009	11.08.2009	11.10.2009	27.10.2009	22.11.2009	02.03.2010	02.03.2010	02.03.2010	19.05.2010	09.09.2010	19.12.2010	18.03.2011	23.03.2011	09.04.2011	09.04.2011	17.05.2011	02.12.2011	16.12.2011	10.02.2012
Ŋ		-	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129

$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 2 13 14 15 16 17 11 1665001 2554010 254910 249 743 259 1021 356 495 30 011 263 253 030 263 263 233 030 263 233 030 230 231 233 030 233 233 030 230 233 233 030 230 233 030 230 231 233 030 230 233 030 230 233 030 031 233 031 033 030 031 033 030 031 033 030 031 032 033 033 033 031 033 031 033 031 033 031 033 031 033 031 033 031 033 032 033 033 033 </th
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 130 28.03.2012 125.401.40 24.49 74.74 22.9 10.21 3.56 4.95 3.90 131 16.05.2012 03.26:40.60 22.44 74.74 22.9 10.21 3.56 4.95 3.10 133 10.05.2012 03.51:15.70 22.44 74.94 27.5 10.21 3.56 4.95 3.10 4.40 1.73 133 12.09.2012 14.41:23.18 42.21 75.42 13.81 9.53 3.10 4.40 1.73 134 06.10.2012 11.41:23.18 42.21 75.42 13.81 9.23 4.92 4.92 1.73 138 06.10.2012 11.41:23.18 42.21 75.42 13.81 9.23 3.76 4.92 1.73 130 07.03.2013 16.19.231 04.324 75.42 3.10 2.26
1 2 3 4 5 6 7 8 9 130 $28.03.2012$ $12.54.401.40$ 42.49 74.74 22.9 10.21 3.56 4.95 131 $16.05.2012$ $02.26.40.60$ 42.49 74.74 22.9 10.21 3.56 4.92 133 $12.09.2012$ $03.26.40.60$ 42.441 73.92 3.91 4.27 133 $12.09.2012$ $03.244.837$ 42.15 75.26 10.0 9.41 4.201 134 $66.10.2012$ $17.44.4837$ 42.15 75.26 10.0 9.41 3.01 4.201 138 $06.10.2012$ $17.44.4837$ 42.15 75.60 13.71 0.205 3.00 4.201 138 $06.00.2013$ 04.303 42.33 76.40 3.01 4.20 138 $06.00.2013$ 04.202 42.40 74.20 3.26 4.20 138 $07.03.$
12345678130 $28.03.2012$ $12:54.01.40$ 42.49 74.74 22.9 10.21 3.56 131 $16.05.2012$ $03:26:40.66$ 42.49 74.74 22.9 10.21 3.53 132 $30.05.2012$ $03:26:40.66$ 42.49 74.94 22.6 10.15 3.47 133 $16.05.2012$ $03:26:40.66$ 42.49 74.94 22.6 10.15 3.47 134 $06.10.2012$ $14.41:23.18$ 42.21 75.42 13.81 9.43 3.07 135 $29.10.2012$ $17.44:48.37$ 42.15 75.42 13.81 9.53 3.66 137 $07.03.2013$ $16:53:55.40$ 43.09 75.66 13.7 10.3 3.50 138 $07.03.2013$ $16:53:55.40$ 43.25 75.66 13.7 10.3 3.50 138 $07.03.2013$ $16:53:55.40$ 42.29 75.60 13.7 10.26 3.46 140 $21.11.2013$ $06:19.21.10$ 42.23 76.40 23.3 10.26 3.66 141 $15.07.2013$ $18:19.08.20$ 42.24 75.60 8.37 47.6 142 $21.10.2013$ $06:19.21.10$ 42.24 75.60 8.37 47.6 143 $17.10.2013$ $06:19.21.10$ $04.13.37$ 76.16 29.29 3.46 144 $21.10.2013$ $16:9.23.55.00$ 42.24 74.90 14.17 10.47 3.66 <tr< th=""></tr<>
123456713028.03.201212:54:01.4042.4974.4422.910.2113116.05.201203:26:40.6042.4974.9422.610.1513230.05.201214:50:291142.5474.0315.89.4213312.09.201205:51:15.7042.4173.923.910.3513406.10.201211:41:23.1842.2175.5610.09.4113529.10.201217:44:483743.2543.2075.6610.613707.03.201306:55:55.0042.24975.9615.39.9313707.03.201306:55:55.0042.24974.9014.1710.4713802.05.201306:55:55.0042.24974.9615.39.9313707.03.201306:55:55.0042.24975.9615.39.9314115.07.201306:92:55.0042.24975.9615.310.6714221.10.201306:19:21.1042.24975.9613.710.4714317.10.201306:19:21.1042.4474.989.3310.2514423.11.201306:19:21.1042.4474.989.3310.2514423.11.201306:19:21.1042.4474.989.3310.2514421.01.201306:19:21.1042.4474.989.3310.5614423.11.201306:19:21.1042.4474.989.3310.56 <trr< th=""></trr<>
123456130 $28.03.2012$ $12.54.01.40$ 42.49 74.74 22.9 131 $16.05.2012$ $03.26.40.60$ 42.49 74.94 22.6 132 $30.05.2012$ $03.25.40.60$ 42.49 74.94 22.6 133 $12.09.2012$ $05.51:15.70$ 42.41 73.92 3.9 135 $29.10.2012$ $11:41.23.18$ 42.21 75.42 13.71 135 $21.11.2012$ $03.44:50.90$ 43.09 75.69 13.7 136 $21.11.2012$ $03.44:50.90$ 42.32 75.96 14.17 137 $07.03.2013$ $04:523:52.40$ 42.33 76.40 23.33 140 $24.06.2013$ $03:03:08.40$ 42.33 76.40 23.33 141 $15.07.2013$ $16:53:52.40$ 42.49 74.90 14.17 142 21.002013 $04:53:52.40$ 42.49 74.90 14.17 143 $17.10.2013$ $06:19:21.10$ 42.49 74.90 14.17 144 21.012013 $06:19:21.10$ 42.49 74.90 14.17 145 $23.11.2013$ $06:19:21.10$ 42.49 74.96 9.23 144 15.072013 $18:19:08.20$ 42.49 74.96 14.17 145 $23.11.2013$ $06:19:21.10$ 42.49 74.96 14.17 146 $23.11.2013$ $06:19:21.10$ 42.49 74.96 16.9 147 14.02012 $18:43.03.71$ 42.49 <
12345130 $28.03.2012$ $12:54.01.40$ 42.49 74.74 131 $16.05.2012$ $12:54.01.40$ 42.49 74.94 132 $30.05.2012$ $12:55.10.6$ 42.49 74.93 133 $12.09.2012$ $05:51:15.70$ 42.41 73.92 134 $06.10.2012$ $11:41:23.18$ 42.21 75.69 135 $29.10.2012$ $17:44:48.37$ 42.15 75.69 136 $21.11.2012$ $03:44:50.90$ 43.09 75.69 137 $07.03.2013$ $16:53:52.40$ 42.20 75.69 138 $02.05.2013$ $03:03:08.40$ 42.33 76.40 139 $06.06.2013$ $03:03:08.40$ 42.33 76.40 140 $15.07.2013$ $16:53:52.40$ 42.49 74.90 141 15.072013 $06:19:21.10$ 42.49 74.93 142 $21.01.2013$ $06:19:21.10$ 42.49 76.01 143 $17.10.2013$ $06:19:21.10$ 42.49 76.01 144 $23.11.2013$ $06:19:21.10$ 42.49 76.01 144 $23.11.2013$ $06:19:21.10$ 42.49 76.01 145 $21.01.2014$ $14:31:32.10$ 42.49 76.01 146 $21.01.2014$ $14:31:32.10$ 42.49 74.93 147 17.02013 $09:19:47.30$ 42.14 76.01 148 $28.04.2014$ $14:31:32.10$ 42.26 74.93 149 $13.05.2014$ $11:305.2014$ <td< th=""></td<>
123413028.03.201212:54.01.4042.4913116.05.201203:26:40.6042.4913230.05.201214:50:29.1042.6413312.09.201214:50:29.1042.6413406.10.201211:41:23.1842.2113529.10.201217:44:48.3742.1513621.11.201203:44:50.9043.0913707.03.201316:53:52.4043.2513807.03.201304:52:25.0042.4913707.03.201304:52:25.0042.4914024.06.201303:03:08.4042.4914115.07.201306:19:21.1042.4914221.01.201306:19:21.1042.4914317.10.201306:19:21.1042.4914423.11.201306:19:21.1042.4914523.11.201306:19:21.1042.4914621.01.201306:19:21.1042.4914714.02.201418:43:03.7142.3014823.11.201309:14:30.5042.4914913.05.201401:18:44.9042.4914913.05.201418:43:03.7142.3014913.05.201418:43:03.7142.3015028:05.201401:18:44.9042.4915125.09.201417:59:17.7042.1415228:012.001509:10:47.5142.2815316.12.201509:10:47.5142.2815421.01.201509:02.201509:10
12313028.03.201212:54.01.4013116.05.201212:54.01.6013116.05.201203:26:40.6013316.05.201203:26:40.6013406.10.201211:41:23.1813529.10.201217:44:48.3713621.11.201203:45:50.9013707.03.201316:53:52.4013802.05.201304:03:34.7013906.06.201303:03:08.4013707.03.201316:53:52.4013807.03.201304:03:34.7014024.06.201309:42:06.8014115.07.201306:19:21.1014221.01.201306:19:21.1014317.10.201306:19:21.1014423.11.201306:19:21.1014523.11.201306:19:21.1014617.10.201306:19:21.1014714.02.201418:43:03.7114823.11.201306:19:21.1014913.05.201401:18:44.9014913.05.201401:18:44.9015028.05.201401:18:44.9015125.09.201417:59:17.7015225.01.201503:03:35.23.6015325.02.201401:18:44.9015421.01.201503:03:35.23.6015525.012.201417:59:17.7015609.02.201509:10:47.5115728.02.201509:10:47.5115728.02.201503:335.23.6015728.02.201503:335.23.601
1 2 130 28.03.2012 131 16.05.2012 133 16.05.2012 134 06.10.2012 135 30.05.2012 136 21.11.2012 137 07.03.2013 138 21.11.2012 137 07.03.2013 138 07.03.2013 139 06.06.2013 140 24.06.2013 141 15.07.2013 143 17.10.2013 144 23.11.2013 145 21.01.2013 146 21.01.2013 147 14.02.2014 148 28.04.2014 149 13.05.2014 150 28.05.2014 151 25.09.2014 152 25.01.2015 153 16.12.2014 154 21.01.2015 155 25.01.2015 156 09.02.2015 157 28.02.2015 157 28.02.2015
1 130 131 131 132 133 134 135 136 137 138 133 133 133 133 134 135 136 137 138 137 138 137 138 139 140 141 142 144 144 145 146 147 148 149 149 150 151 155 157 158 157 158 157 157 157 157 157 158 157 157 158 157 157

Type of focal	mechanism	18	B3-C (TH-S)	B3-C (TH-S)	B3 (TH)	B3 (TH)	B3-C (TH-S)	CT (SH)	CB (SV)	B3-C (TH-S)	B3 (TH)	CT (SH)	CT (SH)	I	CB (SV)	B3 (TH)	CE (NF)	Ι	B3 (TH)	CB-C (NF-S)	B3 (TH)	CB (SV)	CT (SH)	B3-C (TH-S)	CT (SH)	R3-C (TH-S)
$e_{_{ m PR}}$	10-2	17	1.06	1.29	1.28	16.84	1.33	1.00	4.65	1.33	4.14	2.02	1.14	3.07	2.65	0.87	2.01	0.83	1.38	1.57	1.07	0.85	0.43	8.23	1.09	3.88
$E_{\rm s},$	10' J	16	0.54	0.64	0.53	1411.67	1.17	0.60	30.53	0.61	5.05	1.03	0.47	4.30	12.97	0.50	15.72	0.46	1.44	1.45	0.82	0.64	0.07	37.12	0.35	21.25
0.26 ariaga del)	$\Delta\sigma$, MPa	15	3.95	4.82	4.77	62.87	4.96	3.73	17.36	4.97	15.45	7.53	4.26	11.46	9.89	3.25	7.52	3.11	5.13	5.88	4.00	3.19	1.59	30.74	4.07	14.48
k = 0 (Madian model)	$r_{\rm M}, { m m}$	14	182	169	160	396	202	196	260	163	154	147	165	178	284	202	364	202	212	194	207	222	165	190	154	260
0.37 model)	$\Delta\sigma, MPa$	13	1.34	1.64	1.62	21.39	1.69	1.27	5.91	1.69	5.26	2.56	1.45	3.90	3.37	1.11	2.56	1.06	1.75	2.00	1.36	1.09	0.54	10.46	1.38	4.93
k = (Brune	r _B , m	12	261	241	229	567	290	280	372	233	221	210	237	256	407	290	521	290	303	277	296	318	237	272	221	372
$M_{0,1}^{(0)}$	Щ. И.	11	0.54	0.53	0.44	89.00	0.94	0.64	6.97	0.49	1.30	0.54	0.44	1.49	5.20	0.62	8.29	0.59	1.11	0.98	0.81	0.80	0.17	4.79	0.34	5.82
$\Omega_0, 10^{-5}$	s.m	10	2.33	2.26	1.90	381.00	4.02	2.74	29.90	2.09	5.55	2.33	1.89	6.37	22.30	2.63	35.50	2.52	4.76	4.18	3.46	3.41	0.71	20.50	1.46	24.90
$f_0,$	Hz	6	5.00	5.40	5.70	2.30	4.50	4.70	3.50	5.60	5.90	6.20	5.50	5.10	3.20	4.50	2.50	4.50	4.30	4.70	4.40	4.10	5.50	4.80	5.90	3.50
W		8	3.44	3.58	3.39	4.82	3.43	3.38	3.92	3.20	3.24	3.09	3.31	3.19	3.56	3.87	4.50	3.55	3.66	3.71	3.44	3.51	2.98	3.59	2.97	4.32
K		7	10.2	10.45	10.1	12.7	10.18	10.09	11.06	9.76	9.84	9.57	96.6	9.75	10.4	10.96	12.10	10.39	10.59	10.67	10.19	10.32	9.36	10.47	9.35	11.77
H,	KH KH	9	14.2	14.9	14.1	29.8	10.3	11.2	6.9	6.8	17.9	16.8	15.5	15.8	6.9	14.7	12.1	11.8	9.83	12.8	15.6	11.0	13.6	10.8	7.00	17.1
inates	٦°	s	74.50	73.86	75.17	73.27	75.15	75.15	75.99	74.65	74.83	74.91	73.91	76.02	75.17	75.14	75.16	75.17	75.16	75.17	74.82	75.17	75.15	73.77	74.97	74.96
Coord	°	4	42.54	42.76	42.55	41.43	42.59	42.59	42.14	42.61	42.28	42.28	42.25	42.22	42.59	42.60	42.59	42.60	42.59	42.60	42.26	42.59	42.59	42.12	42.19	42.12
Time	1	3	03:35:30.42	23:40:18.58	21:43:17.80	06:13:56.82	10:24:12.20	12:43:00.95	17:31:46.97	03:08:38.86	02:23:27.40	22:03:22.57	06:29:40.88	11:54:15.03	00:41:52.43	00:43:08.33	00:55:43.91	02:41:13.09	02:21:06.79	00:49:15.47	15:58:47.65	23:39:32.39	20:13:50.59	15:20:22.75	06:11:41.01	05:33:10.27
Date		2	08.04.2015	21.06.2015	04.10.2015	01.12.2015	08.02.2016	10.02.2016	09.04.2016	01.08.2016	01.09.2016	16.09.2016	22.09.2016	11.02.2017	21.04.2017	21.04.2017	21.04.2017	21.04.2017	22.04.2017	26.04.2017	04.05.2017	04.05.2017	08.05.2017	11.05.2017	29.05.2017	29.07.2017
No			160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.344.42+551.466.62

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473

Оперативный прогноз локальных цунами по данным ближайших к очагам глубоководных станций, содержащим шумы сейсмического происхождения

© 2020 Ю. П. Королев*, П. Ю. Королев

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: Yu P K@mail.ru

Резюме. Достоверный оперативный прогноз цунами на Курильских островах при возникновении землетрясений в районе Курило-Камчатской впадины представляет наибольшую сложность. Прогноз традиционным магнитудным методом зачастую приводит к ложным тревогам цунами. На примерах событий 2006, 2007 и 2020 гг. на Курильских островах, а также события 2018 г. на Аляске показано, что по данным ближайших к очагу цунами станций измерения уровня океана, времена пробега цунами до которых составляют 10–20 мин, возможен заблаговременный адекватный прогноз цунами вблизи побережий, несмотря на то что записи таких станций содержат шумы сейсмического про-исхождения. Расчеты форм цунами вблизи побережья по данным, содержащим сейсмический шум, показали, что в результирующих формах волн присутствуют высокочастотные колебания. Однако эти колебания не препятствуют оценке реальной формы волны и степени опасности ожидаемого цунами. В отличие от методов прогноза, основанных на магнитудном критерии, примененный способ оперативного прогноза цунами позволяет рассчитать форму волны: амплитуды первой, максимальной волн, времена их прихода в заданную точку и предполагаемую длительность цунами. Предложенный способ может стать инструментом, который позволит повысить качество оперативного предупреждения о цунами, существенно уменьшив количество ложных тревог.

Ключевые слова: цунами, магнитуда землетрясения, тревога цунами, Онекотан, Курильские острова, Северо-Курильск, способ оперативного прогноза цунами, заблаговременность прогноза, DART, шумы сейсмического происхождения

Short-term forecast of local tsunamis based on data containing seismic noise from deep-ocean stations closest to the sources

Yury P. Korolev*, Pavel Yu. Korolev

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: Yu P K@mail.ru

Abstract. Reliable short-term tsunami forecast on the Kuril Islands when earthquakes occur in the Kuril-Kamchatka Trench is the most difficult. Forecasting by the traditional magnitude method often leads to false tsunami alarms. Based on the examples of the events of 2006, 2007 and 2020 on the Kuril Islands, as well as the event of 2018 in Alaska, it was shown that according to the data of the ocean level measuring stations closest to the tsunami source (tsunami travel time is 10–20 minutes) it is possible to adequately predict the tsunami near the coast. Calculations of tsunami waveforms near the coast from data containing seismic noise have shown that the resulting waveforms contain high-frequency oscillations. However, these fluctuations do not interfere with the assessment of the real waveform and the danger of the expected tsunami forecast makes it possible to calculate the waveform: the amplitudes of the first, maximum waves, their arrival time at a given point and the estimated duration of the tsunami. The proposed method can become a tool that will improve the quality of operational tsunami warning, significantly reducing the number of false tsunami alarms.

Keywords: tsunami, earthquake magnitude, tsunami alarm, Onekotan, Kuril Islands, Severo-Kurilsk, method of short-term tsunami forecast, forecast lead time, DART, seismic noise Для цитирования: Королев Ю.П., Королев П.Ю. Оперативный прогноз локальных цунами по данным ближайших к очагам глубоководных станций, содержащим шумы сейсмического происхождения. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 4, с. 447–473. (На рус. и англ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473 *For citation:* Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. Short-term forecast of local tsunamis based on data containing seismic noise

For citation: Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. Short-term forecast of local tsunamis based on data containing seismic noise from deep-ocean stations closest to the sources. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 447–473 (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.447-460.461-473

Благодарности и финансирование

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания и предложения, которые были учтены при доработке статьи.

Работа выполнена в рамках госзадания ИМГиГ ДВО РАН № АААА-А18-118012290123-8 «Наводнения на морских берегах: мониторинг, моделирование, прогноз».

Введение

Тревога цунами 25.03.2020 по Северо-Курильскому району (Сахалинская область) была объявлена в 14:00 (здесь и далее указывается сахалинское время, разница составляет +11 ч с UTC и +8 ч с московским временем) Информационно-обрабатывающим центром «Южно-Сахалинск» Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН на основании магнитудного критерия. Землетрясение магнитудой 7.3 с эпицентром в 220 км восточнее о. Онеко-

тан произошло в 13:49. Впоследствии магнитуда уточнена до 7.5 (Search Tsunami Events of the National Centers for Environmental Information – https://www.ngdc.noaa.gov/ hazel/view/hazards/tsunami/ event-search)¹.

Тихоокеанский центр предупреждения о цунами (PTWC, Гонолулу) в 13:57 выпустил бюллетень с предупреждением об опасных волнах цунами для побережья в пределах 45° 1000 км от эпицентра землетрясения. Японское метеорологическое агентство (JMA) в 14:16 также предупредило о возможных разрушительных волнах цунами на Курильских островах с амплитудой 1-3 м, о чем сообщало Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (http://sakhugms.

ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami). Положение эпицентра землетрясения указано на рис. 1. Это цунами по наименованию ближайшего острова можно называть Онекотанским цунами 2020 г. по аналогии с наименованием Симуширское цунами 2006 г.

В силу небольшой высоты волны, не представляющей опасности, тревога 25.03.2020 оказалась фактически ложной.

Приход цунами в Северо-Курильск ожидался в 15:04. Эвакуация населения в безопасную зону завершена к 14:30. Эвакуировано



Рис. 1. Схема расчетной области. Звездочки – эпицентры землетрясений с указанием года, ромбы – положение станций системы DART, треугольник – пост измерений уровня моря «Водопадная» (V), SK – Северо-Курильск, К – Курильск, В – Буревестник, YK – Южно-Курильск, Ки – Кусиро, На – Ханасаки.

¹ Полные сведения об источниках данных см. в конце статьи.

около 400 человек. Согласно визуальным наблюдениям с сопки Сигнальная в 1.2 км южнее порта Северо-Курильск, первая волна пришла через 1 ч после начала землетрясения. На фоне штормового волнения высота цунами оценивалась в 50 см. На рис. 2 представлен снимок прибрежной акватории в момент прихода цунами в район Северо-Курильска. Тревожный режим сохранялся до 17:57 (почти 4 ч) (http:// sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentrtsunami).

Приведенные описания действий российской службы предупреждения о цунами, а также международных служб цунами, в частности Японского метеорологического агентства, позволяют оценить недостатки действующих регламентов прогноза цунами.

Аналогичные ситуации имели место в 2006 и 2007 гг. (Симуширские цунами 2006 и 2007 гг.). Объявлялись тревоги цунами по магнитудному критерию на побережьях всех Курильских островов, произведена эвакуация населения в безопасные места. Однако цунами для населенных пунктов не представляли опасности. Тревоги оказались фактически ложными.

При сильных цунами остановка производства, эвакуация персонала, населения из опас-



Рис. 2. Подход серии волн цунами 25.03.2020 к о. Парамушир (около 1.2 км южнее порта Северо-Курильск). *Фото Л. Котенко* (http://sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami)

ных зон являются оправданными. При слабых же, когда амплитуда волн в населенных пунктах не превышает 0.5 м, как в событиях 2006, 2007 и 2020 гг., эти мероприятия сопровождаются неоправданным ущербом, связанным с остановкой производства, излишним стрессом для населения. К тому же длительность тревожного режима зачастую излишне велика. Частые ложные тревоги порождают негативное к ним отношение, недоверие. Игнорирование сигналов тревоги во время сильнейшего цунами Тохоку 2011 г. в Японии отчасти послужило причиной большого количества жертв.

Согласно современным представлениям, службы предупреждения о цунами должны объявлять не только обоснованные общие тревоги, но и дифференцированные по степени опасности для конкретных участков побережий. Идеально тревога цунами должна объявляться с разумной заблаговременностью только в тех пунктах, в которых цунами представляет реальную опасность, и сопровождаться информацией о времени прихода первой волны, максимальной волны, их амплитудах, а также об ожидаемом времени окончания цунами (отбой тревоги цунами) [Korolev, 2011]. Именно эти характеристики цунами перечислены в определении прогноза цунами, сфор-

мулированном Межправительственной океанографической комиссией (МОК) ЮНЕСКО в 2013 г.² На основании магнитудно-географического критерия такой детальный прогноз невозможен.

Гидрофизические способы прогнозирования цунами не опираются на магнитуду землетрясения. Достоверной для оценки степени опасности цунами является информация о сформировавшемся цунами, получаемая в океане станциями системы DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis – оценка и передача данных о цунами в океане) (http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart).

Очевидно, что в случае локальных цунами (при землетрясениях в районе Курило-Камчатской впадины) оперативность, заблаговременность

² Intergovernmental Oceanographic Commission. 3rd ed. Tsunami Glossary. 2016. Paris, UNESCO. IOC Technical Series, 85. (English, French, Spanish, Arabic, Chinese) (IOC/2008/TS/85 rev.2). URL: http://legacy.ioc-unesco.org/index. php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=10442 (accessed 6.11.2020)

прогноза зависит от близости станций к очагу цунами. Данные таких станций могут содержать наложенные на полезный сигнал шумы сейсмического происхождения, обусловленные прохождением по дну океана поверхностных волн (рэлеевские волны). Поскольку дискретность записей данных станций равна 1 мин, шумовая составляющая может иметь периоды 4 мин и более, что сопоставимо с характерными периодами цунами (около 15 мин). Применение критерия разделения полезного сигнала и шума, описанного в [Нурисламова, Носов, 2016], в такой ситуации, по-видимому, затруднительно или невозможно. Это обстоятельство может стать препятствием для получения адекватного прогноза. В условиях оперативного режима требуется за короткое время оценить степень опасности цунами, не занимаясь проблемой разделения сигналов.

Цель работы и постановка численных экспериментов

Целью работы являлось исследование возможности оперативного прогноза локальных цунами по данным ближайших к очагам станций измерения уровня океана, содержащим неустранимые шумы сейсмического происхождения.

Рассмотрены все известные события в северной и северо-западной частях Тихого океана, во время которых либо производилась регистрация, либо возможно восстановление (реконструкция) формы цунами вблизи очага.

Моделировался процесс оперативного прогнозирования Онекотанского (25.03.2020), Симуширских (15.11.2006 и 13.01.2007) цунами, возникших в районах северных и центральных Курильских островов, и Аляскинского цунами (25.03.2018) с эпицентром вблизи о. Кодьяк (Кадьяк). Моделирование осуществлялось по реконструированным данным виртуальных станций измерения уровня океана, в точках нахождения ранее существовавшей станции DART 21402, действующей станции DART 21419, ближайших к очагам цунами 2020, 2006 и 2007 гг., а также по реальным данным станции DART 46409 в 2018 г. Как реальные, так и реконструированные данные станций DART содержали шумы сейсмического происхождения.

Расчеты (реконструкция записей и расчет цунами) выполнялись способом оперативного прогноза цунами, описанным в работе

[Korolev, 2011]. Способ (экспресс-метод) заключается в построении передаточной функции для каждого пункта, позволяющей по данным станции DART рассчитывать форму ожидаемого цунами вблизи этого пункта. Построение передаточной функции производится сразу после получения информации о координатах эпицентра землетрясения, вызвавшего цунами. Основой для ее построения являются результаты расчета волновых форм от простого аксиально-симметричного источника с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения, в точках регистрации и прогноза. Данных о магнитуде землетрясения не требуется. При использовании технологий быстрого расчета цунами построение передаточной функции может быть завершено до момента прохода первого периода цунами через точку регистрации. Технология быстрого расчета распространения цунами представлена, например, в [Lavrentiev et al., 2019].

В численных экспериментах оценивались заблаговременность прогноза цунами (время между расчетным временем прихода цунами – первого гребня волны в заданную точку и временем выполнения прогноза) и качество прогноза. За критерий качества прогноза принята возможность оценки степени опасности ожидаемого цунами в заданном пункте, достаточно точной для принятия решения об объявлении тревоги.

В дальнейшем в численных экспериментах расчет формы цунами вблизи побережья называется ретроспективным прогнозом, или прогнозом.

Цунами 25.03.2020 зарегистрировано глубоководными станциями измерения уровня океана DART 21415, 21416 и 21419 (рис. 1) (https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml). Небольшое цунами зарегистрировал пост измерения уровня моря «Водопадная» (Камчатка, Россия) (http://rtws.ru/sea-level/). По данным станций возможна адекватная оценка опасности цунами на побережье островов. Однако удаленность станций от побережья не может обенеобходимую заблаговременность спечить прогноза и объявления тревоги в реальных условиях.

Положение ранее функционировавшей российской станции DART 21402 является оптимальным с точки зрения заблаговременности прогноза цунами для побережья северных Курильских островов. Оперативный прогноз цунами по ее данным мог быть получен раньше, чем по данным станции DART 21416. В численном эксперименте вводится виртуальная станция в месте нахождения ранее функционировавшей российской станции DART 21402.

Для моделирования процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами 2020 г. выполнена реконструкция формы цунами в точке нахождения станции DART 21402 по фактической записи «чистого» цунами станции DART 21416. «Чистому» цунами соответствует ряд данных от 21 до 36 мин от начала землетрясения (рис. 3 а). Реконструированная форма «чистого» цунами на станции DART 21402 приведена на рис. 3 б.

Для анализа влияния сейсмического шума на возможность и качество прогноза цунами выполнена реконструкция возможного сейсмического шума в записях станции DART 21402 также по данным о шуме станции DART 21416. К рассчитанным формам цунами добавлены шумовые составляющие записей станции DART 21416 длительностью 21 мин от момента начала землетрясения. При расчете этих составляющих учтено изменение амплитуды волны Рэлея за счет цилиндрической расходимости с расстоянием от эпицентра до точки регистрации. Реконструирован-



Рис. 3. Исходные данные численного эксперимента: а – запись станции DART 21416, б – реконструированная форма «чистого» цунами на виртуальной станции DART 21402, в – реконструированная запись с шумом на станции DART 21402.

ная запись виртуальной станции DART 21402, включающая шумовую компоненту, изображена на рис. 3 в.

Прогноз цунами 2020 г. на Курильских островах выполнен по реконструированной записи станции DART 21402 длительностью 28 мин.

Цунами 2006 и 2007 гг. зарегистрированы несколькими станциями системы DART, ближайшей к очагу является станция DART 21414. Станция находится в районе западных Алеутских островов на долготе 178° в.д., ее положение выходит за рамки схемы, изображенной на рис. 1. Время пробега цунами до этой станции превышает 2 ч, что заведомо не обеспечивает заблаговременность прогноза цунами на Курильских островах. Оптимальным для южных и северных Курильских островов с точки зрения заблаговременности прогноза цунами, возникающих в районе центральных Курильских островов, является положение станции DART 21419, установленной лишь в 2009 г. Для решения задачи моделирования процесса оперативного прогнозирования Симуширских цунами 2006 и 2007 гг. выполнена реконструкция формы цунами в точке нахождения в настоящее время станции DART 21419 по фактическим данным станции DART 21414. К данным о цунами в этой точке добавлены реконструированные шумы сейсмического происхождения, зарегистрированные станцией DART 21414. Подробно моделирование процесса оперативного прогноза Симуширских цунами 2006 и 2007 гг. описано в работе [Королев, 2019].

На рис. 4 а, б представлены исходные данные, полученные станцией DART 21414 в 2006 и 2007 гг. (https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml), реконструированные формы цунами («чистые» цунами) виртуальной станции DART 21419 (рис. 4 в, г), а также реконструированные записи этой станции с добавленным шумом (рис. 4 д, е).

Численный эксперимент по моделированию процесса оперативного прогноза цунами заключался в расчете формы ожидаемого цунами в населенных пунктах Курильских островов и о. Хоккайдо по реконструированным данным о цунами виртуальной станции DART 21419.



Рис. 4. Исходные данные численного эксперимента: а, б – запись станции DART 21414; в, г – реконструированная форма «чистого» цунами на станции DART 21419; д, е – реконструированная запись с шумом на станции DART 21419.

Аляскинское землетрясение 23.01.2018 с эпицентром в точке с координатами 56°02'46" с.ш., 149°04'23" з.д. вблизи о. Кадьяк (англ. Kodiak) вызвало слабое цунами, зарегистрированное рядом станций системы DART (https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml), а также множеством береговых мареографов. Цунами не причинило ущерба, но событие предоставляет хорошую возможность проверить на фактическом материале справедливость различных моделей прямого расчета и оперативного прогноза цунами. 60°

На рис. 5 изображена схема расчетной области.

Ближайшая к очагу цунами станция DART 46409 находилась на расстоянии около 90 км от эпицентра при времени пробега около 10 мин. Ввиду этого данные станции содержат запись как собственно цунами, так и шум, обусловленный сейсмическими причинами (волнами Рэлея), наложенный на полезный сигнал (https:// ndbc.noaa.gov/dart.shtml).

Исходными данными для прогноза являлась запись этой станции, из которой удалены только приливные составляющие. Согласно оценкам NOAA Center for Tsunami Research: Kodiak (https:// nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123), в записи станции DART 46409 собственно цунами отвечают данные начиная с 7-й минуты записи (рис. 6). Предшествующие колебания обусловлены сейсмическим шумом.

Численный эксперимент заключался в моделировании процесса оперативного прогнозирования цунами 23.01.2018 для северной и северо-восточной частей Тихого океана по данным станции DART 46409.



Рис. 5. Схема расчетной области. Звездочка – эпицентр землетрясения, ромб – положение станций системы DART, кружок – населенные пункты: Коd – Кадьяк, Yak – Якутат, СС – Кресент Сити, PSL – Порт Сан Луис.



Рис. 6. Исходная (черная линия) запись станции DART 46409 на 23.01.2018 и восстановленная форма цунами (красная линия) (https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123).

Результаты

Онекотанское цунами 2020 г.

Для построения передаточной функции решена вспомогательная задача расчета волновых форм в точках регистрации цунами и вблизи заданных населенных пунктов от кругового начального возвышения свободной поверхности диаметром 100 км и амплитудой 10 м с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения. Расчет выполнялся в сферических координатах с использованием разностной сетки с шагом 1 км на широте 45°. Расчетная область численного эксперимента представлена на рис. 1.

Расчеты вблизи населенных пунктов Курильских островов, а также вблизи поста измерения уровня моря «Водопадная» выполнены в точках, в которых глубины воды равны 10–20 м. Эти величины определяются возможностями разностной сетки, а также тем, что на этих глубинах волны заведомо являются линейными.

Для сравнения результатов расчета с фактическими данными выполнен расчет формы цунами на станции DART 21415 и у побережья Камчатки вблизи поста измерения уровня моря «Водопадная». Расчет выполнен по данным о «чистом» цунами станции DART 21402. Результат представлен на рис. 7.

Расчетная и зарегистрированная формы волны на станции DART 21415 достаточно хорошо соответствуют друг другу. Качество расчетов сопоставимо с подобными расчетами в (https://nctr.pmel.noaa.gov/kuril20200325). Аналогичное качество совпадения получено в расчетах цунами по детальной информации о землетрясении 25.03.2020 и начальному смещению уровня океана, представленных на сайте Научного совета по проблемам цунами при Отделении наук о Земле РАН (http://ocean.phys.



Рис. 7. Результаты расчета формы цунами по данным о «чистом» цунами станции DART 21402 во время Онекотанского цунами 2020 г.

msu.ru/tsunami-council/news/2020/04/200325-namidance/).

Неплохо согласуются расчетная форма волны вблизи поста измерений уровня моря «Водопадная» и запись, полученная этим постом. При необходимости расчетная форма волны вполне пригодна для оценки опасности цунами вблизи этого пункта.

Расчет ожидаемого цунами для населенных пунктов Курильских островов выполнен по реконструированным данным с шумом и без шума виртуальной станции DART 21402 длительностью 28 мин от начала землетрясения. Результат расчета представлен на рис. 8.

Рассчитанные по данным с шумом и без шума формы цунами для Курильска и Южно-Курильска практически не искажены и хорошо совпадают друг с другом.

Форма цунами вблизи Северо-Курильска, рассчитанная по данным с шумом, содержит высокочастотные колебания. Нетрудно понять, даже при небольшом опыте знакомства с зарегистрированными формами цунами, что высокочастотные осцилляции в расчетной форме не имеют отношения к цунами. Реальную же форму цунами и степень опасности вполне можно оценить, несмотря на наличие этих высокочастотных выбросов. Расчетная по данным без шума форма цунами также изображена на рис. 8.

На основании полученного расчета может быть сделан вывод о том, что в Северо-Курильске приход первой волны с амплитудой около 15 см ожидается через 69 мин после начала землетрясения. Визуальная оценка высоты волны



Рис. 8. Результаты ретроспективного моделирования процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами 2020 г. по реконструированным данным без шума и с шумом станции DART 21402 вблизи населенных пунктов Курильских островов. Вертикальная черта – момент выработки прогноза.

50 см сделана вблизи уреза воды при глубине около 1 м. Рассчитанная амплитуда 15 см получена в точке, где глубина моря равна 17 м. В соответствии с известным законом Грина, согласно которому амплитуда волны a_1 на глубине D_1 связана с амплитудой a_0 на глубине D_0 соотношением $a_1/a_0 = (D_0/D_1)^{1/4}$, пересчет амплитуды 15 см в точку, где глубина равна 1 м, а волна остается линейной, дает величину амплитуды около 30 см.

Расчетная форма волны для Буревестника также содержит высокочастотные колебания. Как и в случае с расчетной формой волны для Северо-Курильска, их наличие не влияет на оценку степени опасности цунами.

Прогноз цунами в перечисленных пунктах по данным о «чистом» цунами действующей станции DART 21416 и виртуальной станции DART 21402 практически идентичны.

Заблаговременность прогноза определяется следующим: получение данных о координатах эпицентра землетрясения – через 11–15 мин после начала землетрясения, время от момента получения информации о координатах эпицентра, необходимое для построения передаточной функции, – до 15 мин. Суммарно момент времени готовности к выполнению прогноза – через 26–30 мин после начала землетрясения. К этому моменту времени станцией DART 21419 может быть получена информация, позволяющая идентифицировать цунами (в условиях эксперимента для расчетов выбирался первый период волны). Прогноз мог быть дан сразу после прохождения первого периода цунами через станцию DART 21402, т.е. через 28 мин после начала землетрясения. Этот момент времени отмечен на рис. 8 вертикальной чертой.

Заблаговременность прогноза составляет для Северо-Курильска 41 мин, для Курильска 65, для Буревестника (бухта Касатка) 71 мин и для Южно-Курильска 116 мин – этого вполне достаточно для принятия решения об объявлении тревоги. Ввиду малых амплитуд ожидаемых волн в этих населенных пунктах тревога могла не объявляться.

К сожалению, из-за отсутствия инструментальных наблюдений подтвердить или опровергнуть представленные результаты расчетов не представляется возможным.

Симуширские цунами 2006 и 2007 гг.

Прогноз цунами 2006 и 2007 гг. выполнен для пунктов Курильских островов и о. Хоккайдо [Королев, 2019]. На рис. 9 представлены результаты прогноза цунами 2006 и 2007 гг. по реконструированным данным с шумом виртуальной станции DART 21419 длительностью 32 и 35 мин от момента начала землетрясения и сравнение с реальными записями.

Результаты прогнозов цунами в Ханасаки хорошо совпадают с формами зарегистрированных цунами. Для события 2007 г. прогноз по данным с шумом отличается от прогноза по «чистым» данным наличием высокочастотных колебаний после 180 мин, не имеющих отношения к цунами. Впрочем, наличие таких колебаний не может повлиять на принятие решения об объявлении тревоги цунами.

Расчетные формы цунами в Кусиро для обоих событий достаточно хорошо совпадают с реальными. Прогнозы, выполненные по данным с шумом и без шума, практически не различаются.



Рис. 9. Результаты ретроспективного прогноза цунами 2006 и 2007 гг. по реконструированным данным с шумом станции DART 21419 длительностью 32 мин (слева) и 35 мин (справа).

Вопреки опасениям, прогноз для Ханасаки и Кусиро по данным, осложненным шумом сейсмического происхождения, вполне адекватен. Качество прогноза позволяет достоверно оценить опасность ожидаемого цунами и принять решение об объявлении тревоги в этих пунктах.

Результаты прогноза для населенных пунктов Курильских островов не приведены ввиду отсутствия регистрации цунами в этих точках и невозможности сравнения расчетных и фактических форм цунами. Тем не менее возможно оценить заблаговременность прогноза для этих пунктов.

Заблаговременность прогноза по данным станции DART 21419 (первый период цунами) для населенных пунктов составляет для Ханасаки 45 мин, Кусиро – 50 мин, Южно-Курильска – 1.5 ч, Буревестника (зал. Касатка о. Итуруп) – 34 мин, Курильска – около 20 мин и Северо-Курильска – около 1 ч. Такая заблаговременность прогноза для пунктов северных и южных Курильских островов обеспечивает своевременную подачу тревоги и эвакуацию населения в безопасные места.

Подобные расчеты по данным с шумом станции DART 21419 выполнены также для точек в океане, в которых находились станции системы DART. Расчеты выполнены в сферических координатах на разностной сетке с шагом 3.83×3.83 км на широте 40° с.ш. Станция DART 21413 находится в 700 морских милях к юго-востоку от Токио, станции DART 46402, 46408 и 46413 расположены вдоль Алеутских



Рис. 10. Результаты ретроспективного прогноза цунами 2006 и 2007 гг. по реконструированным данным с шумом станции DART 21419 в местах нахождения станций системы DART в океане.

Геосистемы переходных зон 2020, 4 (4): 447–473

островов. На рис. 10 приведены результаты расчетов.

В событии 2006 г. наличие шумов в исходных данных (на станции DART 21419) не влияет на качество прогноза.

Для Симуширского цунами 2007 г. наличие шумов в исходных данных виртуальной станции DART 21419 приводит к появлению шумов в результирующих формах волн на станциях DART 46413, 46408 и 21413. Однако их наличие, как и в событии 2020 г. (прогноз для Северо-Курильска и Буревестника), не вызывает трудностей с оценкой формы собственно цунами и степени его опасности. Расчетные формы волн по данным без шума той же станции практически совпадают с зарегистрированными.

Аляскинское цунами 2018 г.

В численных экспериментах для построения передаточной функции использовался вспомогательный источник с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения, диаметром 75 км и с максимальной амплитудой 8 м. Применялись сферические координаты на разностной сетке с шагом 3.83 × 3.83 км на широте 40° с.ш. Схема расчетной области представлена на рис. 4.

Прогноз выполнен по данным станции DART 46409 длительностью 16 мин от начала землетрясения, включающим записи как собственно цунами, так и сейсмического шума (рис. 5). Результаты прогноза в точках регистрации станциями системы DART в океане представлены на рис. 11. Для сравнения с формой реального цунами использовались данные станций системы DART (https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml).

Несмотря на имеющиеся выбросы, получено достаточно хорошее соответствие расчетных и фактических форм. Результаты расчета позволяют оценить степень опасности цунами. Качество прогноза соответствует качеству расчетов, представленных в (https://nctr.pmel. noaa.gov/alaska20180123).

Прогноз выполнен также для некоторых пунктов северо-восточной части Тихого океана. Результаты представлены на рис. 12. Данные мареографов для сравнения взяты из Sea Level Station Monitoring Facility (http://www. ioc-sealevelmonitoring.org/list.php?showall=a& output=general&order=location&dir=asc). Влияние сейсмического шума в записи станции DART 46409 на рассчитанные формы цунами не проявляется.

Ввиду грубости разностной сетки расчетные точки находились на достаточно большом удалении от регистрирующих мареографов (от 3 до 15 км). Несмотря на значительные расхождения в местоположениях расчетных точек и мареографов, получено неплохое



Рис. 11. Результаты прогноза цунами по данным станции DART 46409 в точках регистрации станциями системы DART в океане.



Рис. 12. Результаты прогноза цунами по данным станции DART 46409 вблизи населенных пунктов.

соответствие головных частей расчетных и фактических волновых форм.

Рассчитанные формы цунами позволяют оценить степень опасности цунами в населенных пунктах. Качество расчетов сопоставимо с подобными расчетами в (https://nctr.pmel. noaa.gov/alaska20180123).

Аналогичный по качеству прогноз получен также по данным других ближайших к очагу станций DART – 49403 и 46410. Прогноз выполнялся по данным о «чистом» цунами, полученным этими станциями.

Обсуждение

Действия службы предупреждения о цунами в Сахалинской области 25.03.2020 в рамках действующего регламента в условиях отсутствия какой-либо информации об ожидаемом цунами являются оправданными. Тем более что международный Тихоокеанский центр предупреждения о цунами (РТWC, Гонолулу) и Японское метеорологическое агентство сообщили о возможных разрушительных волнах цунами на Курильских островах с амплитудой 1-3 м. Однако, ввиду малой амплитуды цунами, объявленная тревога оказалась ложной по прогнозам как сахалинской, так и зарубежных служб. Необоснованным является и продление тревоги цунами уже после прихода первых волн малой амплитуды. И сахалинская служба цунами, и Тихоокеанский центр действовали на основании магнитудно-географического

метода, разработанного в середине прошлого века, который с корректировками в настоящее время является основным способом предупреждения о цунами. В силу статистического характера магнитудного способа службы цунами с момента создания до 2009 г. подали большое количество ложных тревог (75 % от общего числа), при этом пропустив некоторое количество цунами [Gusiakov, 2011]. Тревога объявлялась на побережьях большой протяженности без информации об ожидаемых высотах волн.

В США гидрофизический способ SIFT (Short-term inundation forecasting for tsunamis краткосрочный прогноз затопления от цунами) по информации о цунами в океане (система DART) дает заблаговременную численную оценку амплитуды, времени пробега, других цунами (https://nctr.pmel.noaa.gov/ свойств tsunami-forecast.html; [Titov, 2009; Wei et al, 2003]). Расчеты выполняются для северо-западного побережья США, побережья Аляски и Алеутских островов. Для северо-запада Тихого океана, включая побережья Камчатки и Курильских островов, Тихоокеанский центр предупреждения о цунами дает прогноз на основе магнитудного критерия.

Японское метеорологическое агентство, ответственное за прогноз цунами на северозападе Тихого океана, действует в соответствии с новым регламентом³. При выработке прогноза используется база данных о высотах

³ UNESCO/IOC. 2019. Users' guide for the Northwest Pacific Tsunami Advisory Center (NWPTAC): Enhanced Products for the Pacific Tsunami Warning System. IOC Technical Series, 142. URL: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf00003 66546?posInSet=1&queryId=d1288da0-390e-47b1-8a51-a529b04abf93 (accessed 6.11.2020)

цунами в большом количестве точек в океане. В частности, для Курильских островов одна из точек находится в нескольких километрах к северу от о. Парамушир, другая – в нескольких километрах к востоку от северной оконечности о. Уруп. База данных основана на результатах предварительных расчетов высот цунами от сейсмических источников с наиболее вероятным механизмом землетрясения и различными магнитудами (8.5, 8.0, 7.5 и 7.0), а также различными глубинами гипоцентров (0, 20, 40, ..., 100 км). Источники достаточно плотно покрывают области вероятных цунамигенных землетрясений. Приближенно оцениваются максимальные амплитуды волн на некотором расстоянии от побережья и вблизи берега на глубинах 1 м в соответствии с известным законом Грина вне зависимости от амплитуды набегающей волны. При этом принятие решения об объявлении тревоги цунами возлагается на региональные центры. Подобный подход предлагался еще в 1996 г. [Whitmore, Sokolowski, 1996] в начале развития системы гидрофизических наблюдений. Впоследствии от такого подхода, как неперспективного, отказались в пользу гидрофизического способа, основанного на данных о сформировавшемся цунами в открытом океане [Titov, 2009; Wei et al, 2003].

Все три прогноза цунами 25.03.2020, основанные на магнитудном критерии, а прогноз ЈМА, по сути, также опирается на оценку магнитуды, оказались неэффективными: при прогнозируемых 1–3 м фактическая высота составила около 0.5 м.

Прогноз ни одной из перечисленных выше служб не отвечает определению прогноза цунами, данному МОК ЮНЕСКО⁴, из-за отсутствия детальной информации об ожидаемом цунами: не определяется ни структура волны, ни длительность тревоги.

В отличие от сейсмологических методов, опирающихся на информацию о магнитуде землетрясения, гидрофизические способы прогноза цунами, использующие данные о сформировавшемся цунами в океане, способны заблаговременно давать информацию об ожидаемом цунами в соответствии с определением МОК ЮНЕСКО.

Один из таких способов, способ оперативного прогноза цунами, требующий сейсмологическую информацию только о времени начала и координатах эпицентра землетрясения, может давать заблаговременный адекватный прогноз. Даже при наличии в исходных данных шумов сейсмического происхождения расчетная форма цунами позволяет оценивать степень опасности, достаточную для принятия решения об объявлении тревоги цунами. Присутствие высокочастотных колебаний в расчетной форме ожидаемого цунами не влияет на адекватность оценки опасности. Расчет волновых форм выполнялся в точках, где глубины воды равны 10-20 м, на расстояниях от береговой черты 1.5-3 км. Расчетные амплитуды служат ориентиром для принятия решения об объявлении тревоги службой предупреждения о цунами. Следует напомнить, что в работе применяется способ, т.е. действующие алгоритмы расчетов, но не программный комплекс, готовый к применению в практической работе. При реализации способа в программном комплексе возможен дальнейший расчет цунами вплоть до береговой черты, если позволяют условия оперативного режима, а также может и должна быть применена фильтрация от высокочастотных выбросов, учтен приливной режим.

К сожалению, в России гидрофизическая подсистема службы предупреждения о цунами не выполняет прогноз по гидрофизическим данным. Россия является едва ли не единственной страной бассейна Тихого океана, не имеющей глубоководных станций измерения уровня океана, позволяющих осуществлять оперативный прогноз цунами. Назрела необходимость разработки российских глубоководных станций измерения уровня океана для раннего и достоверного обнаружения и оперативного прогноза цунами⁵.

Более того, на Курильских островах, наиболее подверженных воздействию цунами, отсутствует регулярная регистрация морского волнения. На рис. 13 изображена схема размещения автоматических постов измерения уровня моря Российской службы предупреждения о цунами. Посты установлены и работают в Камчатском, Хабаровском и Приморском краях, но отсутствуют на Курилах.

⁴ http://legacy.ioc-unesco.org/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=10442

⁵ Решение VII Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». 2019. URL: http://emsd.ru/conf2019lib/pdf/solution.pdf (дата обращения: 6.11.2020)



Рис. 13. Пункты измерения уровня моря на Дальнем Востоке (отмечены треугольниками) (http://rtws.ru/sea-level/).

Выводы

Выполнено моделирование процесса оперативного прогнозирования цунами 2006, 2007, 2018 и 2020 гг. по данным ближайших к очагам станций, содержащим неустранимые шумы сейсмического происхождения. Для цунами 2018 г. моделирование проводилось по фактическим данным находившейся в непосредственной близости к очагу станции DART 46409. Записи содержали шумы, обусловленные прохождением волн Рэлея. Для событий 2006, 2007 и 2020 гг. подобные данные отсутствуют, поэтому выполнена реконструкция записей ближайших к очагам виртуальных станций измерения уровня океана, включающих сейсмические шумы, по данным более удаленных от очагов станший DART.

Наличие неустранимого шума в данных близких к очагу станций приводит к появлению в результатах расчетов высокочастотных колебаний, наложенных на форму собственно цунами. Несмотря на это, возможна адекватная оценка формы цунами. Качество расчета достаточно для заблаговременного принятия решения об объявлении тревоги в том пункте, в котором цунами представляет реальную угрозу. Результат полностью соответствует определению прогноза цунами МОК ЮНЕСКО.

Результаты расчетов хорошо совпадают с данными регистрации цунами прибрежными мареографами и станциями системы DART в океане. Качество прогноза, выполняемого предложенным способом оперативного прогноза цунами, сопоставимо с качеством расчетов гидрофизическим способом SIFT (США).

Вопреки предположению, что неустранимый сейсмический шум в записи цунами на ближних к очагу станциях может препятствовать получению адекватного прогноза, оперативный прогноз локальных цунами вполне возможен, несмотря на высокочастотные колебания, наложенные на форму ожидаемого цунами.

Предложенный способ оперативного прогноза цунами при реализации его в едином программном комплексе может служить инструментом, который позволит повысить качество оперативного предупреждения о цунами, существенно уменьшив количество ложных тревог цунами.

Список литературы

1. Королев Ю.П. **2019.** О возможности оперативного прогноза локальных цунами на Курильских островах. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 12(4): 14–20. https://doi.org/10.7868/s2073667319040026

2. Нурисламова Г.Н., Носов М.А. **2016.** Горизонтальные движения водного слоя при прохождении волн цунами по данным густой сети глубоководных станций уровня моря. *Вестник Московского университета, Серия 3, Физика, астрономия*, 5: 50–55.

3. Gusiakov V.K. **2011.** Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data. *Pure and Applied Geophysics*, 168(11). 2033–2041. https://doi.org/10.1007/s00024-011-0286-2

4. Korolev Yu.P. **2011.** An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 3081–3091. https://doi:10.5194/nhess-11-3081-2011

5. Lavrentiev M., Lysakov K., Marchuk An., Oblaukhov K., Shadrin M. **2019.** Fast evaluation of tsunami waves heights around Kamchanka and Kuril Islands. *Science of Tsunami Hazards*, 38(1): 1–13.

6. Titov V.V. **2009.** Tsunami forecasting. In: E.N. Bernard, A.R. Robinson (eds). *The Sea*. Vol. 15: *Tsunamis*. Cambridge, MA; London, England: Harvard Univ. Press, 367–396.

7. Wei Y., Cheung K.F., Curtis G.D., McCreery Ch.S. **2003.** Inverse algorithm for tsunami forecasts. *J. Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering. ASCE*, 129(2): 60–69. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-950x(2003)129:2(60)

8. Whitmore P.M., Sokolowski T.J. **1996.** Predicting tsunami amplitudes along the North American coast from tsunamis generated in the Northwest Pacific Ocean during tsunami warnings. *Science of Tsunami Hazards*, 14(3): 147–166.

Источники данных

1. Научный Совет по проблемам цунами при Отделении наук о Земле РАН: Результаты моделирования цунами 25.03.2020 с помощью модели NAMI-DANCE.

URL: http://ocean.phys.msu.ru/tsunami-council/news/2020/04/200325-namidance/ (дата обращения: 6.11.2020)

2. Российская служба предупреждения о цунами: Измерения уровня моря. URL: http://rtws.ru/sea-level/ (дата обращения: 6.11.2020)

3. Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: Об угрозе цунами после землетрясения у побережья Северо-Курильского района 25 марта 2020 года.

URL: http://sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami (дата обращения: 6.11.2020)

4. National Centers for Environmental Information: Search Tsunami Events.

URL: https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search (accessed 6.11.2020)

5. National Data Buoy Center. URL: https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml (accessed 6.11.2020)

6. NOAA Center for Tsunami Research: DART. URL: http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart (accessed 6.11.2020)

7. NOAA Center for Tsunami Research: Kodiak, Alaska Tsunami, January 23, 2018 Main Event Page. URL: https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123 (accessed 6.11.2020)

8. NOAA Center for Tsunami Research: Kuril Islands Tsunami, March 25, 2020 Main Event Page. URL: https://nctr.pmel.noaa.gov/kuril20200325 (accessed 29.11.2020)

9. NOAA Center for Tsunami Research: Tsunami Forecasting. URL: https://nctr.pmel.noaa.gov/tsunami-forecast.html (accessed 7.12.2020)

10. Sea Level Station Monitoring Facility (Unesco. IOC). URL: http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/list. php?showall=a&output=general&order=location&dir=asc (accessed 6.11.2020)

Об авторах

КОРОЛЕВ Юрий Павлович (ORCID 0000-0002-7068-7341), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, Yu_P_K@mail.ru

КОРОЛЕВ Павел Юрьевич (ORCID 0000-0003-3741-7654), младший научный сотрудник, лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

TRANSLATION

УДК 550.344.42+551.466.62

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473

Short-term forecast of local tsunamis based on data containing seismic noise from deep-ocean stations closest to the sources

Yury P. Korolev*, Pavel Yu. Korolev

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: Yu P K@mail.ru

Abstract. Reliable short-term tsunami forecast on the Kuril Islands when earthquakes occur in the Kuril-Kamchatka Trench is the most difficult. Forecasting by the traditional magnitude method often leads to false tsunami alarms. Based on the examples of the events of 2006, 2007, and 2020 on the Kuril Islands, as well as the event of 2018 in Alaska, it was shown that according to the data of the ocean level measuring stations closest to the tsunami source (tsunami travel time is 10–20 minutes) it is possible to adequately predict the tsunami off the coast. Calculations of tsunami waveforms near the coast by the data containing seismic noise has shown that the resulting waveforms contain high-frequency oscillations. However, these fluctuations do not interfere with the assessment of the real waveform and the danger of the expected tsunami forecast makes it possible to calculate the waveform: the amplitudes of the first and maximum waves, their arrival time at a given point and the expected duration of the tsunami. The proposed method can become a tool that will improve the quality of short-term tsunami warning, significantly reducing the number of false tsunami alarms.

Keywords: tsunami, earthquake magnitude, tsunami alarm, Onekotan, Kuril Islands, Severo-Kurilsk, method of short-term tsunami forecast, forecast lead time, DART, seismic noise

For citation: Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. Short-term forecast of local tsunamis based on data containing seismic noise from deep-ocean stations closest to the sources *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 447–473 (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473

Для цитирования: Королев Ю.П., Королев П.Ю. Оперативный прогноз локальных цунами по данным ближайших к очагам глубоководных станций, содержащим шумы сейсмического происхождения. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, №, 4. с. 447–473. (На рус. и англ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473

Acknowledgements and Funding

Authors are grateful to the reviewers for useful comments and suggestions, which were taken into account when finalizing the work.

The work is carried out within the framework of state assignment IMGG FEB RAS no. AAAA-A18-118012290123-8 "Coastal floods: monitoring, simulation, forecast".

Introduction

The tsunami alarm on 25.03.2020 for the Severo-Kurilsk district (Sakhalin region) was announced at 14:00 (hereinafter Sakhalin time is indicated, the difference is 11 hours ahead of UTC and 8 hours ahead of Moscow time) by the "Yuzhno-Sakhalinsk" Informational Processing Center of the Sakhalin branch of the Federal Research Center United Geophysical Survey RAS on the basis of the magnitude criterion. An earthquake with a magnitude of 7.3 with an epicenter 220 km east of Onekotan Island occurred at 13:49. The magnitude was subsequently clarified to 7.5 (Search Tsunami Events of the National Centers for Environmental Information – https://www.ngdc.noaa. gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search)¹.

¹ Full information about the data sources see in the end of the article.

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Королев Ю.П., Королев П.Ю. Оперативный прогноз локальных цунами по данным ближайших к очагам глубоководных станций, содержащим шумы сейсмического происхождения. *Translation by G.S. Kachesova*.

At 13:57, the Pacific Tsunami Warning Center (PTWC, Honolulu) issued a tsunami warning bulletin for the coastal zone within 1000 km of the earthquake epicenter. At 14:16, the Japan Meteorological Agency (JMA) has also warned of possible devastating tsunami waves in the Kuril

Islands with an amplitude of 1–3 m, as reported by the Sakhalin Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring (http:// sakhugms.ru/index.php/o-nas/ strutura/tsentr-tsunami). The location of the earthquake epicenter is shown in Figure 1. By the name of the nearest island, this tsunami can be called the 2020 Onekotan tsunami by analogy with the name of the 2006 Simushir tsunami.

Due to the low height of the wave, which is not dangerous, the alarm on 25.03.2020 turned out to be actually false.

The arrival of the tsunami in Severo-Kurilsk was expected at 15:04. Evacuation of the population to the safe zone was completed by 14:30. About 400 people were evacuated. According to visual observations from the Signalnaya hill 1.2 km south of the Severo-Kurilsk port, the first wave has arrived 1 hour after the earthquake beginning. Against the background of the storm waves, the tsunami height was estimated at 50 cm. Figure 2 shows a snapshot of the coastal waters when the tsunami has arrived at the vicinity of Severo-Kurilsk. The alarm mode was maintained until 17:57 (almost 4 hours) (http://sakhugms.ru/index.php/onas/strutura/tsentr-tsunami).

The above descriptions of the actions of the Russian tsunami warning service, as well as international tsunami services, in particular the Japan Meteorological Agency, allow us to assess the shortcomings of the current tsunami forecasting regulations.

Similar situations took place in 2006 and 2007 (Simushir tsunamis of 2006 and 2007). Tsunami alarms were announced by the magnitude

criterion on the coasts of all the Kuril Islands, and the population was evacuated to safe places. However, these tsunamis had posed no danger to human settlements. The alarms were actually false.

In the case of strong tsunamis, the stop of manufacture and evacuation of personnel and



Figure 1. The scheme of the area of simulation. Asterisks – the earthquakes epicenters, diamonds – the DART stations location, triangle – the "Vodopad-naya" sea level measuring station (V), SK – Severo-Kurilsk, K – Kurilsk, B – Burevestnik, YK – Yuzhno-Kurilsk, Ku – Kushiro, Ha – Hanasaki.



Figure 2. Arrival of a series of tsunami at Paramushir Island on 25.03.2020 (about 1.2 km south of the Severo-Kurilsk port). *Photo by L. Kotenko* (http://sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami)

population from hazardous areas are justified. For weak tsunamis, when the wave amplitude in settlements does not exceed 0.5 m, as for the events of 2006, 2007, and 2020, these actions are accompanied by unjustified damage associated with a stop of manufacture, an unnecessary stress for the population. In addition, the duration of the alarm mode is often too long. Frequent false alarms arise a negative attitude towards them and distrust. Ignoring the alarms during the worst 2011 Tohoku, Japan tsunami was partly responsible for numerous casualties.

According to the modern concepts, tsunami warning services should announce not only wellgrounded general alarms, but also differentiated by the hazard degree for specific areas of the coast. Ideally, a tsunami alarm should be announced with a reasonable lead time only at those points where the tsunami poses a real danger, and be accompanied with information about the arrival time of the first wave, the maximum wave, and their amplitudes, as well as the expected time of the end of the tsunami (tsunami alarm clearing) [Korolev, 2011]. It is these characteristics of a tsunami that are listed in the definition of a tsunami forecast formulated by the Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) of UNESCO in 2013². Such a detailed forecast is impossible on the basis of the magnitude-geographical criterion.

Hydrophysical methods of tsunami forecasting do not lean upon earthquake magnitude. Information about the formed tsunami obtained in the ocean by DART stations (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) is reliable for assessing the degree of tsunami hazard. (http:// nctr.pmel.noaa.gov/Dart).

Obviously, in the case of local tsunamis (during the earthquakes in the Kuril-Kamchatka depression), the timeliness and lead time of the forecast depend on the proximity of the stations to the tsunami source. The data from such stations may contain seismic noises superimposed on the desired signal due to the passage of surface waves (Rayleigh waves) along the ocean floor. Since the discreteness of the records of these stations is 1 min, the noise component can have periods of 4 min or more, which is comparable to the characteristic periods of a tsunami (about 15 min). The application of the criterion for useful signal and noise separation, described in [Nurislamova, Nosov, 2016], appears to be difficult or impossible. This circumstance can become an obstacle to obtaining an adequate forecast. Under operational conditions, it is required to assess the degree of tsunami hazard in a short time without dealing with the problem of signal separation.

Aim of the work and numerical experiments set up

This work aimed to study the possibility of short-term (operational) forecast of local tsunamis based on the the data of ocean level measurement stations closest to the sources, containing unavoidable noise of seismic origin.

We considered all known events in the northern and northwestern parts of the Pacific Ocean, during which either the registration was made or the restoration (reconstruction) of the tsunami waveform near the source is possible.

The process of short-term forecasting of the Onekotan (25.03.2020), Simushir (15.11.2006 and 13.01.2007) tsunamis, which occurred in the regions of the northern and central Kuril Islands, and the Alaska tsunami (25.03.2018) with an epicenter near the Kodiak Island, was simulated. The simulation was carried out using the reconstructed data from virtual stations of ocean level measurement, at the locations of the previously existing DART 21402 station, the operating DART 21419 station, closest to the tsunami foci of 2020, 2006 and 2007, as well as the real data from the DART 46409 station in 2018. Both the real and reconstructed data from the DART stations contained noise of seismic origin.

Computations (reconstruction of records and calculation of tsunamis) were carried out using the method of short-term tsunami forecast described in [Korolev, 2011]. This method (express method) consists in constructing a transfer function for each point, which allows calculating the waveform of the expected tsunami near this point using the DART station data. The transfer function is constructed immediately after receiving information about the coordinates of the epicenter of the earthquake that caused the tsunami. The basis for its construction is the results of waveforms calculation from a simple axially symmetric source with a center, coinciding with the earthquake epicenter, at the points of registration and forecast.

² Intergovernmental Oceanographic Commission. 3rd ed. Tsunami Glossary. 2016. Paris, UNESCO. IOC Technical Series, 85. (English, French, Spanish, Arabic, Chinese) (IOC/2008/TS/85 rev.2). URL: http://legacy.ioc-unesco.org/index. php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=10442 (accessed 6.11.2020)

No earthquake magnitude data is required. When using the technologies for rapid tsunami calculation, the construction of a transfer function may be completed prior the moment the first tsunami period passes through the registration point. For example, the technology for rapid calculation of tsunami propagation is presented in [Lavrentiev et al., 2019].

In numerical experiments, the lead time of the tsunami forecast (the time between the estimated arrival time of the tsunami (first wave crest) at a given point and the time of the forecast execution) and the forecast quality were estimated. The possibility of assessing the hazard degree of the expected tsunami at a given point, which is sufficiently accurate to make a decision on the alert, is taken as the criterion of the forecast quality.

Further in numerical experiments, the calculation of the tsunami waveform near the coast is called retrospective forecast, or forecast.

Tsunami on 25.03.2020 was registered by the DART 21415, 21416, and 21419 deep-sea stations of ocean level measurement (Figure 1) (https:// ndbc.noaa.gov/dart.shtml). A small tsunami was recorded by the "Vodopadnaya" sea level measuring station (post) (Kamchatka, Russia) (http://rtws.ru/sea-level/). According to the data of the DART stations, an adequate assessment of the tsunami hazard on the coast of the islands is possible. However, the remoteness of the stations from the coast cannot provide the necessary lead time for forecasting and announcing the alarm in real conditions.

The position of the previously functioning Russian DART 21402 station is optimal with regard to lead time of the tsunami forecast for the coast of the northern Kuril Islands. The short-term forecast of the tsunami by the data of this station could be obtained earlier than by the data of the DART 21416. In the numerical experiment, a virtual station is introduced at the location of the previously functioning Russian DART 21402 station.

To simulate the process of short-term forecasting of the 2020 Onekotan tsunami, the tsunami waveform was reconstructed at the location of the DART 21402 station based on the actual record of the "pure" tsunami from the DART 21416 station. A "pure" tsunami corresponds to a series of data from 21 to 36 minutes from the earthquake origin time (Figure 3 a). The reconstructed waveform of the "pure" tsunami at the DART 21402 is shown in Figure 3 b.

To analyze the influence of seismic noise on the possibility and quality of tsunami forecast, we reconstructed the possible seismic noise in the records of the DART 21402 station also by the data on noise of the DART 21416 station. The noise components of the records of the DART 21416 station with a duration of 21 min from the earthquake origin time were added to the calculated tsunami waveforms. When calculating these components, the change in the amplitude of the Rayleigh wave due to the cylindrical divergence with the distance from the epicenter to the registration point was taken into account. The reconstructed record of the DART 21402 virtual station, including the noise component, is shown in Figure 3 c.

The 2020 tsunami forecast for the Kuril Islands was made based on the reconstructed record of the DART 21402 station with a duration of 28 minutes.

Tsunamis of 2006 and 2007 have been recorded by several stations of the DART system, the DART 21414 station is the closest to the focus. The station is located in the western Aleutian Islands at a longitude of 178° E, its location is beyond the scope of the diagram shown in Figure 1. Tsunami travel time to this station exceeds 2 hours, that necessarily does not provide the lead time of the tsunami forecast on the Kuril Islands. The position of the DART 21419 station installed only in 2009 is optimal for the southern and northern Kuril Islands with regard to the lead time of forecast of tsunamis occurring in the area of the central Kuril Islands. To solve the problem of simulation of the process of operational forecast of the 2006 and



Figure 3. Initial data of the numerical experiment on 2020 Onekotan tsunami forecasting: a – record of the DART 21416 station, b – reconstructed waveform of a "pure" tsunami at the DART 21402 station, c – reconstructed record with noise at the DART 21402 virtual station.



Figure 4. Initial data of the numerical experiment on 2006 and 2007 Simushir tsunamis forecasting: a, b – record of the DART 21414 station; c, d – reconstructed waveform of "pure" tsunami at the DART 21419 station; e, f – reconstructed record with noise at the DART 21419 station.

2007 Simushir tsunamis, the tsunami waveform was reconstructed at the current location of the DART 21419 using the actual data of the DART 21414. The reconstructed noises of seismic origin recorded by the DART 21414 station were added to the tsunami data at this point. A detailed simulation of the process of short-term forecast of the Simushir tsunamis in 2006 and 2007 is described in [Korolev, 2019].

Figure 4 a, b show the initial data obtained by the DART 21414 station in 2006 and 2007 (https://ndbc. noaa.gov/dart.shtml), reconstructed tsunami waveforms ("pure" tsunamis) of the DART 21419 virtual station (Figure 4 c, d), as well as the reconstructed records of this station with added noise (Figure 4 e, f).

A numerical experiment on simulation of the process of short-term tsunami forecast consisted in calculating the waveform of the expected tsunami in the human settlements of the Kuril Islands and Hokkaido Island using the reconstructed tsunami data from the DART 21419 virtual station.

Alaska earthquake on 23.01.2018 with an epicenter at the point with

coordinates of 56°02'46" N, 149°04'23" W near Kodiak Island caused a weak tsunami recorded by a number of the DART stations (https://ndbc. noaa.gov/dart.shtml), as well as by many coastal tide gauges. The tsunami did not cause any damage, but the event provides a good opportunity to test the validity of various models of direct calculation and short-term tsunami forecast using the factual material.



Figure 5. The scheme of the area of simulation. The asterisk is the epicenter of the earthquake, the diamonds are the positions of the DART stations, the circles are the settlements: Kod – Kodiak, Yak – Yakutat, CC – Crescent City, PSL – Port San-Luis.



Elapsed time since EQ occurrence (hour)

Figure 6. Initial (black line) record of the DART 46409 station in 2018.01.23 and reconstructed tsunami waveform (red line) (https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123).

Figure 5 shows the scheme of area of simulation.

The DART 46409 station closest to the tsunami source was located at a distance of about 90 km from the epicenter with a travel time of about 10 min. Therefore, the data of this station contain a record of both the tsunami as such and the noise caused by seismic reasons (Rayleigh waves) superimposed on the useful signal (https:// ndbc.noaa.gov/dart.shtml).

The initial data for the forecast was the record of this station, from which only the tidal components were removed. According to the NOAA Center for Tsunami Research: Kodiak (https:// nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123), in the record of the DART 46409 station, the tsunami itself corresponds to the data starting from the 7th minute of the record (Figure 6). The preceding oscillations are conditioned by seismic noise.

The numerical experiment consisted in simulation of the process of short-term forecast of the tsunami on 23.01.2018 for the northern and northeastern parts of the Pacific Ocean using the data from the DART 46409 station.

Results

2020 Onekotan tsunami

To construct the transfer function, we solved the support task of waveforms calculating at the points of tsunami registration and near the given settlements from the circular initial elevation of the free surface with a diameter of 100 km and an amplitude of 10 m with a center coinciding with the earthquake epicenter. The calculation was carried out in spherical coordinates using a difference grid with a step of 1 km at a latitude of 45°. The calculated area of the numerical experiment is shown in Figure 1.

Calculations near the settlements of the Kuril Islands, as well as near the "Vodopadnaya" sea

level measuring station, were performed at the points where the water depths are 10–20 m. These values are determined by the capabilities of the difference grid, as well as by the fact that waves at these depths are obviously linear.

To compare the calculation results with the actual data, the tsunami waveform was calculated at the DART 21415 station and off the coast of Kamchatka near the "Vodopadnaya" sea level measuring station. The calculation was carried out by the data on the "pure" tsunami of the DART 21402 station. The results are shown in Figure 7.

The calculated and recorded waveforms at the DART 21415 station conform to each other well enough. The quality of the calculations is comparable with the similar calculations in (https:// nctr.pmel.noaa.gov/kuril20200325). A similar quality of coincidence was obtained in tsunami calculations based on detailed information about the earthquake of 25.03.2020 and the initial shift of the ocean level presented on the website of the Scientific Council on Tsunami Problems at the Department of Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences (http://ocean.phys.msu.ru/tsunami-council/news/2020/04/200325-namidance/).

The calculated waveform near the "Vodopadnaya" sea level measuring station and the record obtained by this station agree well. If necessary, the calculated waveform is quite suitable for assessing the tsunami hazard near this point.

The calculation of the expected tsunami for the settlements of the Kuril Islands was carried out on the basis of reconstructed noisy and noise-free data from the DART 21402 virtual station with a



Figure 7. The results of the tsunami waveform calculation using the data on the «pure» tsunami by the DART 214 02 station during the 2020 Onekotan tsunami.



Figure 8. Results of the retrospective short-term forecast of the 2020 Onekotan tsunami according to the reconstructed noisy and noise-free data from the DART 21402 station. The vertical bar is the moment of forecast.

duration of 28 minutes from the earthquake origin time. The calculation result is shown in Figure 8.

The tsunami waveforms for Kurilsk and Yuzhno-Kurilsk, calculated using the noisy and noisefree data, are practically not distorted and coincide well with each other.

The tsunami waveform near Severo-Kurilsk calculated from noisy data contains high-frequency oscillations. Even having a little experience of acquaintance with the registered tsunami waveforms, it is easy to understand, that high-frequency oscillations in the calculated waveform are not related to tsunamis. The actual waveform of the tsunami and the hazard degree can be assessed well despite the presence of these high-frequency emissions. The tsunami waveform calculated by the noise-free data is also shown in Figure 8.

Based on the obtained calculation, we can conclude that in Severo-Kurilsk the arrival of the first wave with an amplitude of about 15 cm is expected 69 minutes from the earthquake origin time. A visual assessment of the wave height of 50 cm was made near the water's edge at a depth of about 1 m. The calculated amplitude of 15 cm was obtained at the point where the sea depth is 17 m. In accordance with the well-known Green's law, under which the wave amplitude a_1 at the depth D_1 is related to the amplitude a_0 at the depth D_0 by the ratio $a_1/a_0 = (D_0/D_1)^{1/4}$, recalculation of the 15 cm amplitude to the point, where the depth is 1 m and the wave remains linear, gives an amplitude of about 30 cm.

The calculated waveform for the Burevestnik also contains high-frequency oscillations. As in the case of the calculated waveform for Severo-Kurilsk, their presence does not affect the assessment of the tsunami hazard.

The tsunami forecast for the listed points by the data on the "pure" tsunami of the DART 21416 operating station and the DART 21402 virtual station are practically identical.

The forecast lead time is determined by the following: the data on the coordinates of an earthquake epicenter should be obtained 11–15 minutes from the earthquake origin time, the time from the moment of receiving information on the epicenter coordinates, which is necessary to construct the transfer function, is up to 15 minutes. In total, the time of readiness for forecast execution is 26-30 minutes from the earthquake origin time. By this moment, the DART 21419 station can receive information that makes it possible to identify the tsunami (under the experimental conditions, the first wave period was selected for calculations). The forecast could be given immediately after the passage of the first tsunami period through the DART 21402 station, i.e. 28 minutes from the earthquake origin time. This time point is marked in Figure 8 with a vertical bar.

The forecast lead time is 41 minutes for Severo-Kurilsk, 65 – for Kurilsk, 71 minutes – for Burevestnik (Kasatka Bay), and 116 minutes – for Yuzhno-Kurilsk. This is enough to make a decision to declare an alarm. Due to the small amplitudes of the expected waves in these settlements, the alarm could not be announced.

Unfortunately, due to the lack of instrumental observations, it is not possible to confirm or refute the presented calculation results.

2006 and 2007 Simushir tsunamis

Forecast of tsunamis 2006 and 2007 was executed for the points of the Kuril Islands and Hokkaido Island [Korolev, 2019]. Figure 9 shows the results of the 2006 and 2007 tsunamis forecast according to the reconstructed noisy data from the DART 21419 virtual station with a duration of 32





Figure 9. Results of the retrospective forecast of the tsunamis of 2006 and 2007 according to the reconstructed noisy data by the DART 21419 station with duration of 32 min (left) and 35 min (right).

and 35 minutes from the earthquake origin time and comparison with the real records.

The results of the tsunami forecasts in Hanasaki coincide well with the waveforms of the recorded tsunamis. For the event of 2007, the forecast based on noisy data differs from the forecast based on "pure" data by the presence of high-frequency oscillations after 180 minutes that are not related to the tsunami. However, the presence of such oscillations cannot affect the decision to declare the tsunami alarm.

The calculated waveforms of the tsunami at Kushiro for both events conform well to the real

ones. The forecasts made by the noisy and noise-free data are almost the same.

Contrary to the fears, the forecast for Hanasaki and Kushiro based on the data complicated with noise of seismic origin is quite adequate. The quality of the forecast makes it possible to reliably assess the hazard of the expected tsunami and make a decision to announce an alarm at these points.

The forecast results for the settlements of the Kuril Islands are not presented due to the absence of tsunami registration at these points and the impossibility of comparing the calculated and actual



Figure 10. Results of the retrospective forecast of the tsunami 2006 and 2007 based on the reconstructed noisy data by the DART 21419 station at the locations of DART stations system in the ocean.

tsunami waveforms. Nevertheless, it is possible to assess the forecast lead time for these points.

The forecast lead time calculated according to the data of the DART 21419 station (the first tsunami period) for the settlements is 45 min for Hanasaki, 50 min – for Kushiro, 1.5 hours – for Yuzhno-Kurilsk, 34 min – for Burevestnik (Kasatka Bay, Iturup Island), about 20 min – for Kurilsk, and about 1 hour – for Severo-Kurilsk. Such a forecast lead time for points in the northern and southern Kuril Islands ensures timely alarm and evacuation of the population to safe places.

Similar calculations based on the noisy data from the DART 21419 station were also performed for the points in the ocean where the DART stations were located. The calculations were performed in spherical coordinates on a difference grid with a step of 3.83×3.83 km at a latitude of 40° N. The DART 21413 station is 700 nautical miles southeast of Tokyo and the DART 46402, 46408 and 46413 are located along the Aleutian Islands. Figure 10 shows the calculation results.

In the case of event of 2006, the presence of noise in the initial data (at the DART 21419) does not affect the forecast quality.

For the 2007 Simushir tsunami, the presence of noise in the initial data of the DART 21419 virtual station leads to the appearance of noise in the resulting waveforms at the DART stations 46413, 46408, and 21413. However, their presence, as in the event of 2020 (forecast for Severo-Kurilsk and Burevestnik) does not cause the difficulties in assessing the waveform of the tsunami itself and its hazard degree. The calculated waveforms from the noise-free data of the same station practically coincide with the recorded ones.

2018 Alaska tsunami

In numerical experiments, an auxiliary source with a center coinciding with the earthquake epicenter, 75 km in diameter and with a maximum amplitude of 8 m was used to construct the transfer function. Spherical coordinates were used on a difference grid with a step of 3.83×3.83 km at a latitude of 40 ° N. The diagram of the area of simulation is shown in Figure 4.

The forecast was made using the data of the DART 46409 station with a duration of 16 min from the earthquake origin time, including records of both the tsunami itself and seismic noise (Figure 5). The forecast results at the points of registration by the DART stations in the ocean are shown in Figure 11. We used the data from the DART stations for comparison with the waveform of a real tsunami (https://ndbc.noaa. gov/dart.shtml).

Despite the existing emissions, we obtained a good enough agreement between the calculated and real waveforms. The calculation results allow us to assess the degree of tsunami hazard.



Elapsed time since EQ occurrence, min

Figure 11. Results of the 2018 Alaska tsunami forecast based on the data from the DART 46409 station at registration points by the DART stations in the ocean.



Figure 12. Results of the 2018 Alaska tsunami forecast based on the data from the DART 46409 station near populated areas.

The quality of the forecast corresponds to the quality of the calculations presented in (https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123).

The forecast was also made for some points near the coast in the northeastern part of the Pacific Ocean. The results are shown in Figure 12. Tide gauge data are taken for comparison from the Sea Level Station Monitoring Facility (http:// www.ioc-sealevelmonitoring.org/list.php?showa ll=a&output=general&order=location&dir=asc). The influence of seismic noise in the record of the DART 46409 station on the calculated tsunami waveforms does not appear.

Due to the roughness of the difference grid, the calculated points were located at a sufficiently large distance from the registering tide gauges (from 3 to 15 km). Despite significant discrepancies in the locations of the calculated points and tide gauges, a good enough correspondence of the head parts of the calculated and actual waveforms was obtained.

The calculated tsunami waveforms allow us to assess the degree of tsunami hazard in populated areas. The quality of the calculations is comparable to similar calculations in (https://nctr.pmel. noaa.gov/alaska20180123).

A forecast of a similar quality was also obtained by the data of other DART stations closest to the source -49403 and 46410. The forecast was carried out using the data on the "pure" tsunami received by these stations.

Discussion

The actions of the tsunami warning service in the Sakhalin Region on 25.03.2020 within the framework of the current regulations in the absence of any information about the expected tsunami are justified. Moreover, the International Pacific Tsunami Warning Center (PTWC, Honolulu) and the Japan Meteorological Agency reported about possible destructive tsunami waves in the Kuril Islands with an amplitude of 1–3 m. However, due to the small amplitude of the tsunami, the announced alarm appeared to be false by the forecast of both the Sakhalin service, and the foreign ones. The prolongation of the tsunami alarm after the arrival of the first low-amplitude waves was also groundless. Both the Sakhalin Tsunami Service and the Pacific Center have operated on the basis of the magnitude-geographic method developed in the middle of the last century, which, with some adjustments, is currently the main method of tsunami warning. Due to the statistical nature of the magnitude method, the tsunami service, since the moment of its creation until 2009, raise a large number (75% of the total number of alarms) of false alarms, while missing some tsunami [Gusiakov, 2011]. The alarm was announced on long coasts without information about the expected wave heights.

In the United States, the hydrophysical SIFT method (Short-term inundation forecasting for tsunamis) based on information about tsunami in

³ UNESCO/IOC. 2019. Users' guide for the Northwest Pacific Tsunami Advisory Center (NWPTAC): Enhanced Products for the Pacific Tsunami Warning System. IOC Technical Series, 142. URL: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf00003 66546?posInSet=1&queryId=d1288da0-390e-47b1-8a51-a529b04abf93 (accessed 6.11.2020)

the ocean (DART system) provides an advance numerical estimate of the amplitude, travel time, and other properties of tsunami (https://nctr.pmel. noaa.gov/tsunami-forecast.html; [Titov, 2009; Wei et al, 2003]). Calculations are performed for the US West Coast, the coast of Alaska and the Aleutian Islands. For the Pacific Northwest, including the coast of Kamchatka and the Kuril Islands, the Pacific Tsunami Warning Center makes a forecast based on the magnitude criterion.

Japan Meteorological Agency in charge of tsunami forecast for the Pacific Northwest, acting under new regulation³. The database of tsunami heights at a large number of points in the ocean is used when forecasting. In particular, for the Kuril Islands, one of the points is located some kilometers north of the Paramushir Island, the other is a few kilometers east of the northern tip of Urup Island. The database is based on the results of preliminary calculations of tsunami heights from seismic sources with the most probable earthquake mechanism and various magnitudes (8.5, 8.0, 7.5 and 7.0), as well as different hypocenter depths (0, 20, 40, ..., 100 km). The sources cover areas of probable tsunamigenic earthquakes rather densely. The maximum wave amplitudes are estimated approximately at a certain distance from the coast and near the shore at depths of 1 m in accordance with the well-known Green's law, regardless of the incoming wave amplitude. In this case, the decision to declare a tsunami alarm is assigned to the regional centers. A similar approach was proposed as early as 1996 [Whitmore, Sokolowski, 1996] at the beginning of the development of the hydrophysical observation system. Subsequently, this approach, as unpromising, was abandoned in favor of the hydrophysical method based on the data on the formed tsunami in the open ocean [Titov, 2009; Wei et al, 2003].

All three forecasts of the tsunami on 25.03.2020, based on the magnitude criterion, and the JMA forecast, in fact, also relies on an estimate of a magnitude, appeared to be ineffective: with the forecasted height of 1-3 m, the actual one was about 0.5 m.

The forecast by any of the above services does not meet the definition of a tsunami forecast given by the UNESCO IOC⁴ due to the lack of detailed information about the expected tsunami: neither the wave structure nor the duration of the alarm are determined.

In contrast to seismological methods based on information on the earthquake magnitude, hydrophysical methods for tsunami forecast using the data on the formed tsunami in the ocean are able to provide information about the expected tsunami in advance in accordance with the UNESCO IOC definition.

One of these methods, the method for shortterm tsunami forecasting, that requires seismological information only about the origin time and coordinates of the earthquake epicenter, can provide an adequate early forecast. Even if the initial data contains the noise of seismic origin, the calculated tsunami waveform makes it possible to assess the hazard degree sufficient to make a decision to declare a tsunami alarm. The presence of high-frequency oscillations in the calculated waveform of the expected tsunami does not affect the adequacy of the hazard assessment. The calculation of waveforms was carried out at the points where the water depths are 10-20 m, at distances from the coastline of 1.5-3 km. The calculated amplitudes serve as a guideline for taking a decision on alarm by the tsunami warning service. It is recalled that the work uses the method, i.e. operating calculation algorithms, but not a software suite ready for use in practical work. When realizing the method in the software suite, it is possible to further calculate the tsunami up to the coastline, if the operating conditions allow it, and filtering from high-frequency emissions can and should be applied, the tidal regime should be taken into account.

Unfortunately, the hydrophysical subsystem of the tsunami warning service in Russia does not perform the forecast based on hydrophysical data. Russia is almost the only country in the Pacific Ocean basin that does not have deep-ocean level measuring stations allowing an short-term tsunami forecast. There is a need to develop Russian deep-ocean level measuring stations for early and reliable detection and short-term forecasting of tsunamis⁵.

Moreover, there is no regular registration of sea disturbance on the Kuril Islands, which are

⁴ http://legacy.ioc-unesco.org/index.php?option=com oe&task=viewDocumentRecord&docID=10442

⁵ [Solution of VII All-Russian scientific and technical conference "Problems of complex geophysical monitoring in the Russian Far East". 2019]. URL: http://emsd.ru/conf2019lib/pdf/solution.pdf (accessed 6.11.2020). (In Russ.).



Figure 13. Sea level measurement posts in the Far East (marked with triangles) (http://rtws.ru/sea-level/).

most vulnerable to tsunami's impact. Figure 13 shows the layout of automatic posts for sea level measurement of the Russian Tsunami Warning Service. Posts have been installed and operate in the Kamchatka, Khabarovsk and Primorye, but they are absent in the Kuriles.

Conclusions

We carried out the simulation of the process of short-term forecast of the tsunami of 2006, 2007, 2018 and 2020 according to the data of the stations closest to the sources, containing unavoidable noise of seismic origin. For the tsunami of 2018, simulation was performed using actual data from the DART 46409 station located in the immediate vicinity of the source. The records contained noise conditioned by the passage of Rayleigh waves. There are no such data for events 2006, 2007 and 2020; therefore, the records of the virtual ocean level measuring stations closest to the sources, including seismic noise, were reconstructed from the data of the DART stations more remote from the sources.

The presence of unavoidable noise in the data of stations close to the source leads to the appearance of high-frequency oscillations superimposed on the waveform of the tsunami itself, in the results of calculations. Despite this, an adequate assessment of the tsunami waveform is possible. The quality of the calculation is sufficient for making an early decision to announce an alarm at the point where the tsunami poses a real hazard. The result is fully consistent with tsunami forecast definition by the UNESCO IOC.

The calculation results correspond well with the data of tsunami registration by the coastal tide gauges and the DART stations in the ocean. The quality of the forecast performed by the proposed method of short-term tsunami forecast is comparable to the quality of calculations using the SIFT method.

Contrary to the assumption that unavoidable seismic noise in a tsunami record at the stations close to the source may prevent from obtaining an adequate forecast, an operational forecast of local tsunamis is quite possible, despite high-frequency oscillations superimposed on the waveform of the expected tsunami.

The proposed method of short-term tsunami forecast, implemented within a single software package, can serve as a tool that will improve the quality of short-term tsunami warning, significantly reducing the number of false tsunami alarms.

472

References

1. Gusiakov V.K. **2011.** Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data. *Pure and Applied Geophysics*, 168(11): 2033–2041. https://doi.org/10.1007/s00024-011-0286-2

2. Korolev Yu.P. **2011.** An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 3081–3091. https://doi:10.5194/nhess-11-3081-2011

3. Korolev Yu.P. **2019.** On opportunity of short-term forecast for local tsunamis in the Kuril Islands. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika* [Fundamental and applied hydrophysics], 12(4): 14–20. (In Russ).

4. Lavrentiev M., Lysakov K., Marchuk An., Oblaukhov K., Shadrin M. **2019.** Fast evaluation of tsunami waves heights around Kamchatka and Kuril Islands. *Science of Tsunami Hazards*, 38(1): 1–13.

5. Nurislamova G.N., Nosov M.A. **2016.** The horizontal motion of a water layer during the passage of tsunami waves based on data from a dense ocean-floor network of deepwater sea-level stations. *Moscow University Physics Bulletin*, 71(5): 520–525. https://doi.org/10.3103/s0027134916050143

6. Titov V.V. **2009.** Tsunami forecasting. In: E.N. Bernard, A.R. Robinson (eds). *The Sea*. Vol. 15: *Tsunamis*. Cambridge, MA; London, England: Harvard Univ. Press, 367–396.

7. Wei Y., Cheung K.F., Curtis G.D., McCreery Ch.S. **2003.** Inverse algorithm for tsunami forecasts. J. Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering. ASCE, 129(2): 60–69.

https://doi.org/10.1061/(asce)0733-950x(2003)129:2(60)

8. Whitmore P.M., Sokolowski T.J. **1996**. Predicting tsunami amplitudes along the North American coast from tsunamis generated in the Northwest Pacific Ocean during tsunami warnings. *Science of Tsunami Hazards*, 14(3): 147–166.

Data sources

1. National Centers for Environmental Information: Search Tsunami Events.

URL: https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search (accessed 6.11.2020)

2. National Data Buoy Center. URL: https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml (accessed 6.11.2020)

3. NOAA Center for Tsunami Research: DART. URL: http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart (accessed 6.11.2020)

4. NOAA Center for Tsunami Research: Kodiak, Alaska Tsunami, January 23, 2018 Main Event Page. URL: https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123 (accessed 6.11.2020)

5. NOAA Center for Tsunami Research: Kuril Islands Tsunami, March 25, 2020 Main Event Page. URL: https://nctr.pmel.noaa.gov/kuril20200325 (accessed 29.11.2020)

6. NOAA Center for Tsunami Research: Tsunami Forecasting.

URL: https://nctr.pmel.noaa.gov/tsunami-forecast.html (accessed 7.12.2020)

7. Sea Level Station Monitoring Facility (Unesco. IOC). URL: http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/list. php?showall=a&output=general&order=location&dir=asc (accessed 6.11.2020)

8. Nauchnyy Sovet po problemam tsunami pri otdelenii nauk o Zemle RAN: Rezultaty modelirovaniya tsunami 25.03.2020 s pomoshchyu modeli NAMI-DANCE [Research Council on the tsunami problems of Earth sciences department RAS: Results of simulation of tsunami 25.03.2020 using the NAMI_DANCE model]. URL http://ocean.phys.msu.ru/tsunami-council/news/2020/04/200325-namidance/ (accessed 6.11.2020)

9. Rossiyskaya sluzhba preduprezhdeniya o tsunami: Izmereniya urovnya morya [Russian tsunami warning service: Measuring sea level]. URL: http://rtws.ru/sea-level/ (accessed 6.11.2020)

10. [Sakhalin service for hydrometeorology and environmental monitoring: On the threat of a tsunami after the earthquake near the coast of the North Kuril region on March 25, 2020].

URL: http://sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami (accessed 6.11.2020)

About the Authors

KOROLEV Yury Pavlovich (ORCID 0000-0002-7068-7341), Cand. in Physics and Mathematics, lead researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, Yu_P_K@mail.ru

KOROLEV Pavel Yurievich (ORCID 0000-0003-3741-7654), junior researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.34.06.013.22

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.474-485

Углегорское землетрясение 13 сентября 2020 года (о. Сахалин): предпосылки возникновения и результаты наблюдений в эпицентральной зоне

© 2020 Е. П. Семенова*1, Н. В. Богинская², Д. В. Костылев^{1,2}

¹Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая службы РАН», Южно-Сахалинск, Россия ²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: semenova@seismo.sakhalin.ru

Резюме. 13 сентября 2020 г. в Углегорском районе Сахалинской области произошло землетрясение с магнитудой Mw = 4.8, которое жители ближайших к эпицентру населенных пунктов ощутили силой до 5 баллов по шкале MSK-64. Всего было зарегистрировано 62 повторных толчка. Сейсмический процесс продолжался около 2 суток, основная масса афтершоков была зарегистрирована в течение первых 7 ч. Эпицентры зарегистрированных землетрясений приурочены к структуре регионального Западно-Сахалинского разлома. Однако тот факт, что в эпицентральной зоне Углегорского землетрясения ведется активная добыча бурого угля на Солнцевском угольном разрезе и массово производятся взрывные работы, не исключает связи сейсмического процесса с техногенной сейсмичностью. В статье приведены результаты наблюдений за сейсмическим процессом в эпицентральной зоне Углегорского землетрясения в сентябре 2020 г., рассмотрены вероятные причины его возникновения. Ключевые слова: сейсмические события, макросейсмические проявления, интенсивность, афтер-

Ключевые слова: сейсмические события, макросейсмические проявления, интенсивность, афтершоки, механизм очага землетрясения

Uglegorsk earthquake on September 13, 2020 (Sakhalin Island): preconditions for the occurrence and results of observations in the epicentral zone

Elena P. Semenova*¹, Natalya V. Boginskaya², Dmitry V. Kostylev^{1,2}

¹Sakhalin Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia ²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: semenova@seismo.sakhalin.ru

Abstract. On September 13, 2020, an earthquake with a magnitude of Mw = 4.8 occurred in the Uglegorsk district of the Sakhalin region. Residents of the localities nearest to the epicenter felt it with a force of up to 5 points on the MSK-64 scale. A total of 62 aftershocks were recorded. The seismic process lasted for about two days, the major mass of aftershocks was registered during the first 7 hours. The epicenters of the registered earthquakes are confined to the system of the regional West Sakhalin fault. However, the fact of active mining of brown coal at the Solntsevskii quarry and massive blasting in the epicentral zone of the Uglegorsk earthquake does not exclude the relation between the seismic process and technogenic seismicity. The article presents the results of observations of the seismic process in the epicentral zone of the Uglegorsk earthquake in September 2020 and considers the probable causes of its occurrence.

Keywords: seismic events, macroseismic manifestations, intensity, aftershocks, earthquake focal mechanism

Для цитирования: Семенова Е.П., Богинская Н.В., Костылев Д.В. Углегорское землетрясение 13 сентября 2020 года (о. Сахалин): предпосылки возникновения и результаты наблюдений в эпицентральной зоне. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 4, с.474 – 485. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.474-485

For citation: Semenova E.P., Boginskaya N.V., Kostylev D.V. Uglegorsk earthquake on September 13, 2020 (Sakhalin Island): preconditions for the occurrence and the results of observations in the epicentral zone. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 474–485. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.474-485

Введение

Землетрясения представляют собой мощное и чрезвычайно опасное природное явление. В конце XX – начале XXI в. население о. Сахалин смогло убедиться в этом на примере катастрофического землетрясения в г. Нефтегорск (1995 г., Mw = 7.2), разрушительного землетрясения в г. Невельск (2007 г., Mw = 6.2). Одно из сильнейших сахалинских землетрясений с Mw = 6.7 произошло 4 августа 2000 г. в Углегорском районе, когда были отмечены значительные повреждения зданий, отдельные из них стали непригодны для жилья. По берегам рек, в полотне шоссейных дорог появились многочисленные обвалы, микрооползни и трещины [Коновалов и др., 2014]. Исследование землетрясений на Сахалине актуально как для понимания сейсмических процессов, протекающих в регионе, так и для оценки сейсмической опасности и риска.

Произошедшее 13 сентября 2020 г. в Углегорском районе землетрясение с магнитудой Mw = 4.8 представляет интерес не только в изучении сейсмичности одного из сегментов глубинных разломов, которые как сетью покрывают остров Сахалин, но и в вопросе о сейсмической активизации вблизи открытых горных выработок [Еманов и др., 2017].

Известно, что в Углегорском районе на протяжении 90 лет ведется длительная и интенсивная разработка полезных ископаемых. Влиянием добычи углеводородов на сейсмичность ранее занимались сотрудники ИМГиГ ДВО РАН на примере нефтегазовых месторождений Северного Сахалина. В своих работах авторы [Адушкин, Турунтаев, 2015] отмечали изменение одного из параметров графика повторяемости, который принимает значения, характерные для техногенной или техногенно-индуцированной сейсмичности. И хотя признаков опасного нарастания сейсмической активности в связи с разработкой месторождений углеводородов на шельфе о. Сахалин выявлено не было [Турунтаев и др., 2015; Коновалов и др., 2016], резкое увеличение в последние годы масштабов добычи угля и количества сопровождающих ее взрывов в Углегорском районе заставляет вернуться к проблеме влияния техногенной деятельности на активизацию сейсмичности.

В эпицентральной зоне произошедшего 13 сентября 2020 г. землетрясения мониторинг проводится сейсмическими станциями региональной сети Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН), которые обеспечивают регистрацию землетрясений начиная с магнитуды 3.2. Сейсмические события с меньшей энергетической силой регистрируются только одной сейсмической станцией в Углегорске и не позволяют в полной мере достоверно локализовать параметры их эпицентров.

В предлагаемой статье отражены результаты обследования эпицентральной зоны Углегорского землетрясения 13.09.2020 и сбора макросейсмических данных группой специалистов СФ ФИЦ ЕГС РАН и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), рассмотрены возможные предпосылки возникновения этого сейсмического события.

Результаты

Параметры Углегорского землетрясения 13 сентября 2020 г.

13 сентября 2020 г. в Углегорском районе Сахалинской области было зарегистрировано землетрясение с магнитудой Мw = 4.8. В табл. 1 приведены параметры главного толчка 13.09.2020 в 13:42 UTC (00:42 14.09.2020 сахалинского времени) по данным международных сейсмологических центров и регионального информационно-обрабатывающего центра (РИОЦ) «Южно-Сахалинск».

На рис. 1 приведена карта с эпицентром землетрясения 13 сентября 2020 г. в 13:42 UTC и показаны варианты локализации эпицентра главного толчка по данным разных сейсмоло-гических служб. Разброс в вариантах положения эпицентра Углегорского землетрясения находится в диапазоне $\Delta \phi = 48.89-48.96^{\circ}$ N, $\Delta \lambda = 142.00-142.15^{\circ}$ Е и определяется различной конфигурацией сети сейсмических станций регистрации, данные которых были использованы при локализации сейсмического события.

Оценка энергетической силы землетрясения 13 сентября 2020 г., выполненная по разным магнитудным шкалам, принятым в практике различных сейсмологических центров, показала сопоставимые по величине значения, среднее отклонение составило ±0.1 единицы (табл. 1).

Значения глубины очага *h* данного сейсмического события колеблются от 8 до 10 км (табл. 1), что соответствует современным заключениям о тектонике о. Сахалин [Оскорбин, Бобков, 1997].
И	Время в	Координать	и эпицентра	England have	Магнитуда	
ИСТОЧНИК	очаге, ч:мин:с	φ° N	λ° Ε	- 1 луоина <i>п</i> , км		
РИОЦ «Южно-Сахалинск»	13:42:26.2	48.89	142.14	8	ML = 4.8 MPV(A) = 4.9	
EMSC	13:42:26.3	48.95	142.06	10	mb = 4.9	
ССД ЕГС РАН	13:42:26.0	48.96	142.00	10	mb = 5.1	
GFZ	13:42:26.8	48.93	142.15	10	mb = 4.8	
USGS	13:42:26.4	48.93	142.09	10	mb = 5.0	

Таблица 1. Параметры землетрясения 13.09.2020 13:42 UTC по данным различных сейсмологических центров Table 1. Parameters of the earthquake on September 13, 2020 13:42 UTC according to the data of various seismological centers

Примечание. РИОЦ «Южно-Сахалинск» – региональный информационно-обрабатывающий центр Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН; EMSC – Европейско-Средиземноморский сейсмологический центр (https://www.emsc-csem.org); ССД ЕГС РАН – Служба срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН; GFZ – германский исследовательский центр геонаук (https://www.gfz-potsdam.de); USGS – Геологическая служба США (https://www.usgs.gov). MPV(A) – магнитуда по волне *P* (тип аппаратуры A), принятая в практике ГС РАН; ML – локальная магнитуда; mb – магнитуда по *P*-волнам короткопериодной записи, принятая в практике USGS/NEIS.

Note. RIPC "Yuzhno-Sakhalinsk" – regional information processing center of the Sakhalin branch of the Federal Research Center of the GS RAS; EMSC – Euro-Mediterranean Seismological Center (https://www.emsc-csem.org); AS GS RAS – Alert Service of the Federal Research Center of the GS RAS; GFZ – German Research Center for Geosciences (https://www.gfz-potsdam.de); USGS – United States Geological Survey (https://www.usgs.gov). MPV(A) – magnitude of the *P*-wave (type of equipment A), accepted in the practice of the GS RAS; ML is the local magnitude; mb – *P*-wave magnitude of a short-period recording, accepted in the USGS / NEIS practice.



Рис. 1. Слева – положение эпицентра Углегорского землетрясения 13.09.2020 г. в 13:42 UTC по данным РИОЦ «Южно-Сахалинск». Справа фрагмент с различными вариантами локализации эпицентра главного толчка по данным: 1 – РИОЦ «Южно-Сахалинск»; 2 – EMSC; 3 – ССД ЕГС РАН; 4 – GFZ; 5 – USGS.

Figure 1. On the left side, there is the epicenter of the September 13, 2020 Uglegorsk earthquake at 13:42 UTC by the data of RIPC «Yuzhno-Sakhalinsk». On the right, there is a fragment with possible epicenters of the main shock according to Table 1: 1 - RIPC «Yuzhno-Sakhalinsk»; 2 - EMSC; 3 - AS GS RAS; 4 - GFZ; 5 - USGS.

Механизм очага землетрясения 13 сентября 2020 г. в 13:42 UTC с магнитудой Mw = 4.8 был определен с помощью вычислительного модуля FOCMEC, интегрированного в комплекс сейсмологических программ SEISAN [Ottemöller et al., 2011]. Всего было использовано 30 знаков вступлений первых движений Р-волны при одном несогласованном знаке, зарегистрированных на вертикальной компоненте записей сейсмических колебаний. В соответствии с полученным решением подвижка в очаге реализовалась в условиях горизонтального субширотного растяжения и близгоризонтального субмеридионального сжатия, т.е. может квалифицироваться как сдвиг, либо левосторонний вдоль плоскости NP1 северо-восточного простирания, либо правосторонний вдоль плоскости NP2 юго-восточного простирания (табл. 2).

В табл. 2 представлено также решение механизма для сильного повторного толчка 13 сентября 2020 г. в 14:09 UTC с магнитудой Mw=4.6. Задействовано 26 знаков первых вступлений Р-волны при 2 несогласованных, зарегистрированных на вертикальной компоненте записей сейсмических колебаний. Тип сейсмодислокации сдвиговый, как и у главного события, однако наклон главных осей напряжений несколько изменился: ось сжатия субмеридионального простирания горизонтальна, а ось растяжения субширотного простирания наклонена под углом к западу, ориентация и направление подвижки по нодальной плоскости NP1 примерно соответствует главному событию, плоскость NP2 поменяла направление падения с юго-западного на северо-восточное.

Макросейсмические проявления Углегорского землетрясения 13 сентября 2020 г.

Землетрясение 13 сентября 2020 г. вызвало сотрясения силой до 5 баллов по шкале сейсмической интенсивности MSK-64 в населенных пунктах Никольское, Краснополье, Медвежье. По результатам макросейсмического обследования в эпицентральной зоне Углегорского землетрясения в этих населенных пунктах были выявлены повреждения отдельных зданий. В с. Медвежье сдвинулся ряд шлакоблоков, которые поддерживали крышу хозяйственной пристройки к одноэтажному дому. В селах Краснополье и Никольское наиболее наглядно повреждения проявились внутри зданий школ: множественные волосяные трещины на стенах и потолке в помещениях классов, выпадения кусков штукатурки; в с. Никольское сдвинулись смежноукрепленные здания школы и спортивного зала. На рис. 2 фрагменты повреждений зданий школ сел Никольское и Краснополье.

В табл. 3 приводятся результаты макросейсмического обследования в эпицентральной зоне Углегорского землетрясения 13 сентября 2020 г.

На рис. 3 представлена карта-схема интенсивности сотрясений от данного землетрясения по результатам проведенного макросейсмического обследования в эпицентральной зоне (табл. 3).

Стоит отметить, что в населенных пунктах Орлово, Ольшанка и Поречье, расположенных на побережье Татарского пролива с западной стороны Камышевого хребта, землетрясе-

						-	-	•	-			
Параметры	Оси главных напряжений		Нодальные плоскости				Tun	Стереограмма				
]	Г]]	P		NP1			NP2		сейсмо-	механизмов
землетрясения	PL	Az	PL	Az	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	дислокации	(нижняя полусфера)
13.09.2020 13:42 UTC Mw = 4.8	9	72	24	338	23	80	-24	118	66	-169	Сдвиг	P C T
13.09.2020 14:09 UTC Mw = 4.6	41	260	3	168	41	65	33	295	60	150	Сдвиг	

Таблица 2. Параметры механизма очага землетрясений 13.09.2020 в 13:42 UTC и в 14:09 UTC
Table 2. Parameters of the focal mechanism of earthquakes on September 13, 2020 at 13:42 UTC and at 14:09 UTC



Рис. 2. Выявленные повреждения зданий школ в селах Никольское (вверху) и Краснополье (внизу) по результатам макросейсмического обследования эпицентральной зоны Углегорского землетрясения 13.09.2020. Фото Д.В. Костылева

Figure 2. Identified deformations of schools in Nikolskoe (top) and Krasnopolye (bottom) according to the results of macroseismic studies of the epicentral zone of the September 13, 2020 Uglegorsk earthquake. *Photo by D.V. Kostylev*

Таблица 3. Результаты макросейсмического обследования в эпицентральной зоне Углегорского землетрясения 13.09.2020

Table 3. Results of macroseismic studies in the epicentral zone of the September 13, 2020 Uglegorsk earthquake

Населенный пункт	D, км	Балл по шкале MSK-64
с. Поречье	11	4
с. Краснополье	13	5
с. Никольское	15	5–6
с. Ольшанка	14	4
с. Медвежье	15	5
с. Ольховка	19	4–5
с. Орлово	16	4–5
г. Углегорск	22	4–5
с. Трудовик	22	4
пос. Шахтерск	32	3–4
с. Айнское	38	Не ощутили
с. Тельновский	55	Не ощутили
с. Лесогорск	60	1–2
с. Красногорск	56	2
с. Ильинское	103	Не ощутили

Примечание. D, км – гипоцентральное расстояние от эпицентра до пункта наблюдений.

Note. D, km - hypocentral distance from the epicenter to the observation point.

ние ощутили слабее. Можно предположить, что это обусловлено особенностью рельефа. На всем протяжении рельеф острова характеризуется как система субмеридиональных поднятий и понижений. И при возникновении землетрясений субмеридиональные поднятия Сахалина частично поглощают энергию сейсмических волн [Семенова и др., 2013].

По данным макросейсмического обследования был построен график затухания интенсивности сотрясений при Углегорском землетрясении 13.09.2020 в зависимости от гипоцентрального расстояния (рис. 4), с использованием метода средних квадратов вычислен коэффициент затухания. При глубине гипоцентра землетрясения h = 8 км коэффициент затухания составил v = 4.2, это соответствует принятому для Сахалина значению $v = 4.3 \pm 0.6$ [Оскорбин, 1977b].



Рис. 3. Карта-схема интенсивности сотрясений Углегорского землетрясения 13.09.2020. Римские цифры – балл интенсивности (табл. 3).

Figure 3. Schematic map of macroseismic intensity of the September 13, 2020 Uglegorsk earthquake. Roman numerals – intensity values (Table 3).



Рис. 4. График затухания интенсивности сотрясений в зависимости от гипоцентрального расстояния *D* при землетрясении 13.09.2020 в 13:42 UTC. Вертикальная ось – интенсивность сотрясений в пунктах наблюдений. Приведены зависимости между интенсивностью сотрясений и гипоцентральным расстоянием.

Figure 4. The graph of the intensity decrease depending on the hypocentral distance D during the September 13, 2020 earthquake at 13:42 UTC. The vertical axis is the intensity at the observation points. The graph shows the relationship between the intensity and the hypocentral distance.



Рис. 5. Карта афтершоков Углегорского землетрясения 13.09.2020 с Мw = 4.8 по данным оперативной обработки в РИОЦ «Южно-Сахалинск».

Figure 5. Aftershock map of the September 13, 2020 Uglegorsk earthquake with Mw = 4.8 according to the operational data processing of RIPC «Yuzhno-Sakhalinsk».

Афтершоки

По результатам сейсмического мониторинга с использованием данных региональной сети сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН в эпицентральной зоне Углегорского землетрясения 13.09.2020 было зарегистрировано 62 повторных толчка и определены их параметры, из них 70 % – по данным только одной сейсмической станции «Углегорск» при фиксированном значении глубины очага. Параметры еще 17 афтершоков были определены более чем по 3 сейсмическим станциям. Самый сильный афтершок Mw = 4.6 произошел спустя 27 мин после основного толчка на глубине 6 км. Его также ощутили жители Углегорского района, но уже с меньшей силой.

Как видно из рис. 5, зона афтершоков Углегорского землетрясения 13.09.2020 растянута в широтном направлении. Такое расположение эпицентров повторных толчков соответствует однонаправленной субмеридиональной конфигурации региональной сети сейсмических станций, которые расставлены вдоль острова на значительных расстояниях друг от друга и не могут в полной мере обеспечить надежное определение эпицентров возникающих землетрясений. Для качественного мониторинга сейсмичности требуется установка дополнительных пунктов сейсмических наблюдений в центральной и северной частях о. Сахалин.

Суммарно выделившаяся в результате Углегорского землетрясения и его афтершоков сейсмическая энергия была равна 5.64 · 10¹² Дж, энергия главного толчка составила более 77 % (рис. 6).

Как можно наблюдать на рис. 6, интенсивное выделение сейсмической энергии происходило в течение первых 7 ч, когда было зарегистрировано 45 афтершоков. Наиболее сильные из них отмечены на диаграмме: в 14:09 UTC (M = 4.5), 16:12 UTC (M = 3.2), 20:49 UTC (M = 3.2) 13 сентября и в 08:24 (M = 3.2) 14 сентября.

Для лучшего понимания природы Углегорского землетрясения 13.09.2020 выполнена оценка спадания афтершоковой активности применительно к закону Утсу–Омори [Utsu, 1961; Utsu et al., 1995] (рис. 7).

Значение показателя степени р ~ -0,6 для афтершоков Углегорского землетрясения 13 сентября 2020 г. существенно отличается от показателей, характерных для естественной сейсмичности, полученных при исследовании



Рис. 6. Распределение во времени суммарно выделившейся сейсмической энергии E_{kum} в результате Углегорского землетрясения 13.09.2020 с Мw = 4.8 и его афтершоков (E_{kum} в логарифмическом масштабе). Красным треугольником выделены главный толчок и наиболее сильные афтершоки, зарегистрированные в эпицентральной зоне.

Figure 6. Time distribution of released seismic energy E_{kum} as a result of the September 13, 2020 Uglegorsk earthquake with Mw = 4.8 and its aftershocks (E_{kum} on a logarithmic scale). The main shock and the strongest aftershocks are marked with a red triangles.



Рис. 7. Тренд спадания афтершокового процесса Углегорского землетрясения 13.09.2020 с Мw = 4.8. Горизонтальная ось – логарифм времени от момента главного толчка, вертикальная – логарифм числа зарегистрированных афтершоков. Символы – количество землетрясений, зарегистрированных в единицу времени. Данные аппроксимированы степенной зависимостью методом наименьших квадратов.

Figure 7. Trend of the aftershock decline process of the September 13, 2020 Uglegorsk earthquake with Mw = 4.8. The horizontal axis is the logarithm of time from the moment of the main shock, the vertical axis is the logarithm of number of registered aftershocks. Number of earthquakes per time unit is marked with triangles. The data were approximated by a power law dependence using the method of least squares.

афтершоковых процессов сахалинских землетрясений на интервале разных значений магнитуд [Семенова 2010; Семенова, Коновалов, 2011], и может являться одним из признаков техногенного влияния на сейсмический процесс [Адушкин, Турунтаев, 2015].

Тектоническая обстановка в зоне Углегорского землетрясения 13.09.2020

Активные разломы о. Сахалин объединяют в Хоккайдо-Сахалинскую сдвиговую зону, которая подразделяется на Западно-Сахалинскую и Восточно-Сахалинскую [Стрельцов, Рождественский, 1995]. Крупнейшие разломы этих зон – Западно-Сахалинский, Центрально-Сахалинский, Восточно-Сахалинский, Хоккайдо-Сахалинский имеют субмеридиональное направление и явные признаки правосторонних сдвиговых смещений [Оскорбин, Бобков, 1997]. Протянувшийся вдоль западного берега островов Сахалина и Хоккайдо Западно-Сахалинский разлом более чем на 1000 км служит границей между Западно-Сахалинским антиклинорием и Татарским синклинорием и проявляется в виде густой сети связанных между собой сбросов, сбросо-сдвигов, взбросов.

Из сопоставления наблюденной сейсмичности со структурнотектоническим планом Сахалина вытекает, что с 1906 г. наиболее высокий уровень реализованного сейсмотектонического потенциала отмечается в зоне контакта структур Сахалина с северной частью Японской котловины [Оскорбин, Бобков, 1997]. В зоне Западно-Сахалинского разлома и оперяющих его структур произошли такие сильные землетрясения, как Александровское с Mw = 6.0 в 1906 г., Углегорско-Лесогорское с Mw = 6.8В 1924 г., Углегорско-Айнское с Mw = 6.7 в 2000 г., Горнозаводское с Mw = 5.7 в 2006 г., Невельское с Mw = 6.2 в 2007 г. [Региональный..., 2006; Поплавская и др., 2006; Фокина, Сафонов, 2012; Сафонов и др., 2013; Коновалов и др., 2014]. Для полноты картины стоит

отметить, что фоновая сейсмичность Западно-Сахалинского разлома проявляется на всем его протяжении, а промежуточные по силе землетрясения возникают эпизодически, исключая перешеек Поясок [Оскорбин, 1977а; Оскорбин, Бобков, 1997].

Обсуждение результатов

В соответствии с приведенными в работе [Оскорбин, Бобков, 1997] характеристиками сейсмогенных зон о. Сахалин, эпицентры углегорских землетрясений в сентябре 2020 г. тяготеют к Западно-Сахалинской шельфовой зоне, которая рассечена субмеридиональными и субширотными разрывными структурами надрегионального Западно-Сахалинского разлома. Наибольшая сейсмическая активность наблюдается на Углегорско-Бошняковском участке этой зоны [Оскорбин, Бобков, 1997]. Эпицентр зарегистрированного 13 сентября 2020 г. землетрясения с магнитудой Mw = 4.8 локализован на северном фланге эпицентральной зоны Углегорско-Айнского землетрясения 4 августа 2000 г., очаг которого был приурочен к составной части Западно-Сахалинского глубинного разлома – Краснопольскому разлому [Прытков, 2006].

Таким образом, Углегорское землетрясение возникло вследствие субширотных растягивающих напряжений и сжимающих близгоризонтальных, тип подвижки – сдвиг. Расположение эпицентров афтершоков даже при имеющемся дефиците станций сети регистрации не противоречит механизму главного толчка в зоне Углегорского землетрясения. Глубины очагов Углегорского землетрясения и его афтершоков находятся в диапазоне 5–14 км, что соответствует характеристикам Западно-Сахалинской шельфовой сейсмогенной зоны (мощность земной коры 28–31 км, гранитного слоя 6–10 км, базальтового 15–18 км).

При интерпретации причин возникновения сентябрьских событий в Углегорском районе обращает на себя внимание также приуроченность эпицентров землетрясений к месту проведения активной добычи бурого и каменного угля. Исследования угольных месторождений в Углегорском районе были начаты в начале ХХ в. японскими геологами [Геология СССР, 1970], а уже в 20-х годах здесь велась активная добыча угля как в шахтах, так и открытым способом [Гришачев, 2019]. В частности, с 1928 г. работала шахта № 3 (пос. Тэннай), которая располагалась в 12 км от расчетного эпицентра. В настоящее время добыча угля в районе ведется открытым способом на нескольких участках, наиболее активно на Солнцевском угольном разрезе (СУР) Восточной горнорудной компании [Солнцевский разрез..., 2019]. Добыча угля здесь проводится на двух участках:

Южный-І и Южный-ІІ. В результате поисковоразведочных работ, в частности каротажных, в 1979–1981 гг. на участке Южный-І Сахалинская геологоразведочная экспедиция объединения «Сахалингеология» выявила осложняющие эксплуатацию факторы, такие как наличие в разрезе слабых пород, трещиноватость, способность пород к размоканию*. В дальнейших геологических исследованиях района добычи также отмечалось наличие тектонических нарушений, в зоне которых устойчивость пород снижается.

Объемы добычи угля на Солнцевском угольном разрезе в последние три года неуклонно увеличивались. При этом пропорционально рос объем вскрышных работ. Так, только за 9 мес. 2020 г. на Солнцевском угольном разрезе перемещено 75.5 млн кубометров горной массы, годом ранее – более 55 млн т (http://miner.ru/info/2733/). При проведении макросейсмического обследования поступали многочисленные жалобы от жителей сел Краснополья, Никольского, Медвежье Углегорского района о взрывных работах, сопровождающихся ударными волнами, от которых дребезжат стекла окон в домах, слышен сильный гул, пугающий население.

СФ ФИЦ ЕГС РАН проводит мониторинг промышленных взрывов, в том числе и в Углегорском районе. По результатам этого мониторинга проанализировали динамику изменения частоты и характера взрывов, зарегистрированных в координатах 48.7–49.5° с.ш. и 141.7– 142.5° в.д., и сопоставили их с сейсмичностью в том же районе (рис. 8).

Обращает на себя внимание тот факт, что при уменьшении общего количества зарегистрированных взрывов с конца 2019 г. их суммарная энергия практически не изменилась, что говорит о возросшей мощности каждого отдельного взрыва. Также можно отметить, что к концу 2019 г. суммарная энергия взрывов, произведенных на участке исследования с 2017 г., превысила суммарную энергию от сейсмических событий за тот же период времени. При этом с начала 2020 г.

^{*}Геологический отчет по предварительной разведке участка Южного Солнцевского буроугольного месторождения на Сахалине, проведенной в 1981–1982 гг. 1982. Исп.: Кириллов Е.М., Гуляева Л.С., Стрючков В.В., Андреева М.Н. Министерство геологии РСФСР, Сахалинское производственное геологическое объединение «Сахалингеология», Сахалинская геологоразведочная экспедиция. Южно-Сахалинск, 131 с. [Geological report on preliminary exploration of the area of Southern Solntsevskoe brown coal field on the Sakhalin conducted in 1981–1982. 1982. Authors: Kirillov E.M., Gulyaeva L.S., Stryuchkov V.V., Andreeva M.N. Ministry of Geology of the RSFSR, "Sakhalingeology" production association, Sakhalin geological survey expedition]. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalingeologiya, 131 p. (In Russ.).



отмечается рост сейсмичности в данном районе (рис. 8).

Кроме Солнцевского месторождения в районе действуют лицензии на добычу угля и на других участках, где ведется или планируется добыча открытым способом – Константиновском и Соболевском. Также в районе находятся разрабатываемые длительное время каменные карьеры андезитов и базальтов – месторождения Эхминское и Изыльметьевское. Такое количество участков активной разработки недр на небольшой (20 × 20 км) площади делает особо важным проведение детального мониторинга данного участка, для чего необходимо размещение дополнительных сейсмических станций и, возможно, привлечение оборудования для комплексного мониторинга (измерения уровня подпочвенного радона, сейсмоакустических наблюдений). На рис. 9 приведена карта с эпицентрами сейсмических событий,



Участки разработки полезных ископаемых Хактические события сейсмического миниторинга
Сейсические события 13 - 21 сентября 2020 г. Цахта № 3 (Тэннфй) 13 - 21 сентября 2020 г. Рис. 8. Сопоставление количества и мощности промышленных взрывов и проявлений сейсмичности района в период I.2017 – IX.2020 с полугодовым интервалом (слева) и накопительного роста объемов добычи угля на СУР с накоплением энергии взрывов и сейсмических событий за тот же период (справа).

Figure 8. Comparison of number and total energy from industrial blasts and the regional seismicity during the period I.2017 – IX.2020 with a biannual interval (left) and cumulative growth of coal production at the SCM with the accumulation of blast energy and seismic events during the same period (right).

участками разработки и возможным местоположением дополнительных станций.

По результатам наблюдений в эпицентральной зоне Углегорского землетрясения 13 сентября 2020 г с Мw = 4.8 на заседании Сахалинского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (протокол заседаний СФ РЭС № 1 от 06.10.2020 г.) было принято решение о проведении детального мониторинга промышленных взрывов на угольных месторождениях.

Заключение

Землетрясение 13 сентября 2020 г. в 13:42 UTC с магнитудой Mw = 4.8. было зарегистрировано сейсмическими станциями региональной и мировой системы сейсмологических наблюдений. Параметры эпицентра по

Рис. 9. Участки добычи полезных ископаемых: 1 – Южный-1 Солнцевское, 2 – Южный-2 Солнцевское (ЗАО «Солнцевский угольный разрез»); 3 – Центральный-бис, 4 – Центральный (ООО «Углегорскуголь»); 5 – Соболевское каменноугольное месторождение (ООО «Угольные ресурсы Сахалина»); 6 – Константиновское месторождение (ООО «Западная угольная компания»); 7 – Эхминское (андезит); 8 – Изыльметьевское (андезитобазальт). На рисунке нанесены эпицентры зарегистрированных землетрясений за период с 13 по 21 сентября 2020 г.

Figure 9. Mine sites: 1 – Yuzhny-1 Solntsevskoye, 2 – Yuzhny-2 Solntsevskoye (ZAO "Solntsevsky coal mine"); 3 – Central-bis, 4 – Central (OOO "Uglegorskugol"); 5 – Sobolevskoe coal deposit (OOO "Ugolnyye resursy Sakhalina"); 6 – Konstantinovskoe deposit (OOO "Zapadnaya ugolnaya kompaniya"); 7 – Ekhminskoe (andesite); 8 – Izylmetyevskoe (andesite-basalt). The figure shows epicenters of the registered earthquakes during the period from September 13 to 21, 2020. данным региональной сейсмологической сети СФ ФИЦ ЕГС РАН и международных сейсмологических центров показали близкие результаты. Наибольшая интенсивность сотрясений 5–6 баллов по шкале MSK-64 была зафиксирована в ближайших к эпицентру населенных пунктах Углегорского района о. Сахалин.

Землетрясение возникло вследствие субширотных растягивающих напряжений и сжимающих близгоризонтальных, тип подвижки – сдвиг.

Региональной сейсмической сетью было зарегистрировано 62 повторных толчка, их эпицентры приурочены к Западно-Сахалинской шельфовой зоне, сейсмичность которой определяется активными субмеридиональными и субширотными разрывными структурами надрегионального Западно-Сахалинского разлома. В течение чуть более 7 ч активного сейсмического процесса зарегистрировано 4 афтершока с магнитудой M ≥ 3.0, наиболее сильный из которых имел магнитуду M = 4.6.

При оценке спадания афтершоковой активности применительно к закону Утсу–Омори получено значение показателя степени р~ -0.6, нехарактерное для естественной сейсмичности сахалинских землетрясений, что может свидетельствовать о техногенном влиянии на сейсмический процесс.

Суммарная энергия зарегистрированных на Солнцевском угольном разрезе взрывов, произведенных с 2017 по 2019 г., превысила этот показатель для сейсмических событий за тот же период времени. При этом с начала 2020 г. отмечается тенденция к активизации сейсмичности в данном районе.

Каротажные работы на одном из участков Солнцевского угольного разреза показали, что проведение вскрышных работ может сопровождаться тектоническими нарушениями в зоне, где устойчивость пород снижается.

Сахалинским филиалом Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска 6 октября 2020 г. принято решение о проведении детального мониторинга промышленных взрывов на участках добычи угольных месторождений. Установка 3–4 короткопериодных сейсмометров в Углегорском районе будет способствовать более точной локализации проводимых там взрывных работ, оценке их воздействия на сейсмическую активизацию, проведению полноценного мониторинга слабой сейсмичности.

Список литературы

1. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. **2015.** *Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная.* М.: ГЕОС, 364 с.

2. Геология СССР. Т. 33. Остров Сахалин. Геологическое описание. 1970. М.: Недра, 432 с.

3. Гришачев С.В. **2019.** Японское губернаторство Карафуто (1905–1945): история и социальная память. *Ежегодник Япония*, 48: 272–286.

4. Еманов А.А., Еманов А.Ф., Фатеев А.В., Лескова Е.В. **2017.** Одновременное воздействие открытых и подземных горных работ на недра и наведенная сейсмичность. *Вопросы инженерной сейсмологии*, 44 (4): 51–62.

5. Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. 2014. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 252 с.

6. Коновалов А.В., Степнов А.А., Гаврилов А.В., Манайчев К.А., Сычёв А.С., Клачков В.А., Сабуров М.С. **2016.** Особенности региональной сейсмичности на севере о. Сахалин в связи с промышленным освоением месторождений нефти и газа на шельфе. *История науки и техники*, 6: 63–71.

7. Оскорбин Л.С. **1977а.** Сейсмичность Сахалина. В кн.: *Сейсмическое районирование Сахалина*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, с. 3–23.

8. Оскорбин Л.С. **1977b.** Уравнения сейсмического поля сахалинских землетрясений. В кн.: *Сейсмическое районирование Сахалина*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 34–45.

9. Оскорбин Л.С., Бобков А.О. **1997.** Сейсмогенные зоны Сахалина и сопредельных областей. В кн.: *Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 154–178. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. 6).

10. Поплавская Л.Н., Нагорных Т.В., Фокина Т.А., Поплавский А.А., Пермикин Ю.Ю., Стрельцов М.И., Ким Чун Ун, Сафонов Д.А., Мельников О.Я., Рудик М.И., Оскорбин Л.С. **2006.** Углегорско-Айнское землетрясение 4 августа 2000 года с *MLH*=7.0, I_0 =8–9 (Сахалин). В кн.: Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. Обнинск: ГС РАН, с. 265–284.

11. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. **2006.** Дислокационная модель очага Углегорского землетрясения 2000 г. (о. Сахалин). *Тихоокеанская геология*, 25(6): 115–122.

12. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг. 2006. Поплавская Л.Н. (ред.) Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.

13. Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Фокина Т.А. **2013.** Невельские землетрясения 2 августа 2007 года с *MLH*=6.3 и *MLH*=6.0, I_0 =8 (о. Сахалин). В кн.: Землетрясения Северной Евразии в 2007 году. Обнинск: ГС РАН, с. 396–407.

14. Семенова Е.П. **2010**. Особенности проявления афтершоковой деятельности сильных сахалинских землетрясений. В кн.: Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири: Материалы регионального сейсмологического симпозиума, 1–4 июня 2010, Хабаровск. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, с. 273–275.

15. Семенова Е.П., Коновалов А.В. 2011. Изучение афтершоковых последовательностей сахалинских землетрясений с помощью обобщенного закона Омори. В кн.: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы VI Международной сейсмологической школы, 15–19 авг. 2011, Апатиты. Обнинск: ГС РАН, с. 311–315.

16. Семенова Е.П., Сафонов Д.А., Фокина Т.А. **2013.** Крильонское землетрясение 25 ноября 2013 г. с М_w = 5.2, *I*₀=6–7 (о. Сахалин). В кн.: Землетрясения Северной Евразии, 22: 466–476.

17. Солнцевский разрез – флагман Дальневосточной угледобычи. 2019. Уголь, 3(1116): 36–39.

18. Стрельцов М.И., Рождественский В.С. **1995.** Активные разломы Курило-Охотского региона, Сахалина, Приморья и Приамурья. В кн.: *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. М.: ОИФЗ РАН, вып. 2/3, с. 387–407.

19. Турунтаев С.Б., Слинькова Е.О., Коновалов А.В. **2015.** Сейсмичность в районе месторождений углеводородов шельфа о. Сахалин. В кн.: *Тригерные эффекты в геосистемах (Москва, 16–19 июня 2015 г.): материалы третьего Всероссийского семинара-совещания.* М.: ГЕОС, с. 39–48.

20. Фокина Т.А., Сафонов Д.А. **2012.** Горнозаводское землетрясение 17 августа 2006 г. с *MLH*=8.9, *К*_c=12.0, *I*₀=7 (Сахалин). В кн.: Землетрясения Северной Евразии в 2006 году. Обнинск: ГС РАН, с. 367–374.

21. Ottemöller L., Voss P., Havskov J. 2011. SEISAN earthquake analysis software: for Windows, Solaris, Linux and Macosx. URL: https://www.uib.no/rg/geodyn/artikler/2010/02/software

22. Utsu T. 1961. Statistical study on the occurrence of aftershocks. *Geophysics*, 30: 521–605.

23. Utsu T., Ogata Y., Matsu'ura R.S. **1995.** The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. *Journal of Physics of the Earth*, 43: 1–33. https://doi.org/10.4294/jpe1952.43.1

References

1. Adushkin V.V., Turuntaev S.B. **2015.** *Tekhnogennaya seysmichnost' – indutsirovannaya i triggernaya* [Technogenic seismicity: induced and triggered]. M.: GEOS, 364 p. (In Russ.).

2. [Geology of the USSR]. Vol. 33. [Sakhalin Island. Geological description]. 1970. Moscow: Nedra, 432 p. (In Russ.).

3. Grishachev S.V. **2019.** Japan's governorate Karafuto (1905–1945): history and social memory. *Yearbook Japan*, 48: 272–286. (In Russ.). https://doi.org/10.24411/2658-6789-2019-10011

4. Emanov A.A., Emanov A.F., Fateev A.V., Leskova E.V. **2018.** Simultaneous impact of open-pit and underground mining on the subsurface and induced seismicity. *Seismic Instruments*, 54 (4): 479–487. https://doi.org/10.3103/s0747923918040035

5. Konovalov A.V., Nagornykh T.V., Safonov D.A. **2014.** Sovremennye issledovaniya mekhanizmov ochagov zemletryaseniy o. Sakhalin [Modern studies of earthquakes source mechanisms of Sakhalin Island]. Vladivostok: Dal'nauka, 252 p. (In Russ.).

6. Konovalov A.V., Stepnov A.A., Gavrilov A.V., Manaychev K.A., Sychev A.S., Klachkov V.A., Saburov M.S. **2016.** Regional seismicity behavior in the Northern Sakhalin in connection to offshore oil and gas fields production. *Istoriya nauki i tekhniki = History of Science and Engineering*, 6: 63–71. (In Russ.).

7. Oskorbin L.S. **1977a.** [Seismicity of Sakhalin]. In.: Seysmicheskoe rayonirovanie Sakhalina [Seismic zoning of Sakhalin]. Vladivostok: DVNTs AN SSSR [FESC AS USSR], 3–23. (In Russ.).

8. Oskorbin L.S. **1977b.** Uravneniya seysmicheskogo polya sakhalinskikh zemletryaseniy [Seismic field equations for the Sakhalin earthquake]. In.: *Seysmicheskoe rayonirovanie Sakhalina* [*Seismic zoning of Sakhalin*]. Vladivostok: DVNTs AN SSSR [FESC AS USSR], 34–45. (In Russ.).

9. Oskorbin L.S., Bobkov A.O. **1997**. [Seismogenic zones of Sakhalin and the adjacent areas]. In.: *Problemy seysmicheskoy opasnosti Dal'nevostochnogo regiona* [*Problems of seismic hazard of the Far East Region*]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN [IMGG FEB RAS], 54–178. (Geodinamika tektonosfery zony sochleneniya Tikhogo okeana s Evraziey = Geodynamics of tectonosphere of the Pacific-Eurasia conjunction zone; vol. 6). (In Russ.).

10. Poplavskaya L.N., Nagornykh T.V., Fokina T.A., Poplavskiy A.A., Permikin Yu.Yu., Strel'tsov M.I., Kim Chun Un, Safonov D.A., Mel'nikov O.Ya., Rudik M.I., Oskorbin L.S. **2006**. [Uglegorsk-Aynsk earthquake of August 4, 2000 with MLH=7.0, I_0 =8.9 (Sakhalin)]. In:: *Zemletryaseniya Severnoy Evrazii v 2000 godu* [*Earthquakes of the Northern Eurasia in 2000*]. Obninsk: GS RAN [GS RAS], p. 265–284. (In Russ.).

11. Prytkov A.S., Vasilenko N.F. **2006.** The dislocation model of the 2000 Uglegorsk earthquake source (Sakhalin Island). *Tikhookeanskaya Geologiya = Geology of the Pacific Ocean*, 25(6): 115–122. (In Russ.).

12. Regional'nyy katalog zemletryaseniy ostrova Sakhalin, 1905–2005 gg. [Regional earthquake catalogue of Sakhalin Island, 1905–2005]. 2006. Poplavskaya L.N. (ed.) Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN [IMGG FEB RAS], 104 p. (In Russ.).

13. Safonov D.A., Nagornykh T.V., Fokina T.A. **2013.** [Nevelsk earthquakes of August 2, 2007 with MLH=6.3 and MLH=6.0, I₀=8 (Sakhalin Island)]. In.: *Zemletryaseniya Severnoy Evrazii v 2007 godu [Earthquakes of the Northern Eurasia in 2007*]. Obninsk: GS RAN [GS RAS], p. 396–407. (In Russ.).

14. Semenova E.P. **2010.** [Features of the manifestation of aftershock activity of strong Sakhalin earthquakes]. In: Problemy seysmichnosti i sovremennoy geodinamiki Dal'nego Vostoka i Vostochnoy Sibiri: Materialy regional'nogo seysmologicheskogo simpoziuma, 1–4 iyunya 2010, Khabarovsk [Problems of seismicity and recent geodynamics in the Far East and Eastern Siberia: Proceedings of the regional seismological symposium, 1–4 June, 2010]. Khabarovsk: ITiG DVO RAN [Institute of Tectonics and Geophysics, FEB RAS], p. 273–275.

15. Semenova E.P., Konovalov A.V. **2011.** [Studies of the aftershock sequences of Sakhalin earthquakes using the Omori generalized law]. In: Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh: Materialy VI Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly, 15–19 avg. 2011, Apatity [Modern methods of seismological data processing and interpretation: Proceedings of the 6th International seismological school, 15–19 August, 2011, Apatity]. Obninsk: GS RAN, p. 311–315.

16. Semenova E.P., Safonov D.A., Fokina T.A. **2013.** [Earthquake near Crillon cape on November 25th, 2013 with Mw=5.2, $I_0=6-7$ (Sakhalin Island)]. In.: Zemletryaseniya Severnoy Evrazii [Earthquakes in Northern Eurasia], 22(2013): 466–476. (In Russ.). https://doi.org/10.35540/1818-6254.2019.22.41

17. [Solntsevsky open-pit coal mine – the flagship of Far Eastern coal mining]. **2019.** *Ugol'*, 3(1116): 36–39. (In Russ.).

18. Strel'tsov M.I., Rozhdestvenskiy V.S. **1995.** [Active faults of the Kuril-Okhotsk region, Sakhalin, Primorye, and Amur region]. In.: Seysmichnost'i seysmicheskoe rayonirovanie Severnoy Evrazii [Seismicity and seismic zoning of the Northern Eurasia]. Moscow: OIFZ RAN [UIPE of RAS], vol. 2–3: 387–407. (In Russ.).

19. Turuntaev S.B., Slin'kova E.O., Konovalov A.V. **2015.** [Seismicity in the area of hydrocarbon fields in the shelf of Sakhalin Island]. In.: *Triggernye effekty v geosistemakh (Moskva, 16–19 iyunya 2015 g.): materialy Tret'ego Vserossiyskogo seminara-soveshchaniya* [*Trigger effects in geosystems (Moscow, 16–19 June, 2013): proceedings of the 3rd All-Russian workshop-meeting*]. Moscow: GEOS, p. 39–48. (In Russ.).

20. Fokina T.A., Safonov D.A. **2012.** [Gornozavodsk earthquake on August 17, 2006 with MLH=8.9, KS=12.0, I_0 =7 (Sakhalin Island)]. In: *Zemletryaseniya Severnoy Evrazii v 2006 godu* [*Earthquakes in Northern Eurasia in 2006*]. Obninsk: GS RAN [GS RAS], p. 367–374. (In Russ.).

21. Ottemöller L., Voss P., Havskov J. **2011.** SEISAN earthquake analysis software: for Windows, Solaris, Linux and Macosx. URL: https://www.uib.no/rg/geodyn/artikler/2010/02/software

22. Utsu T. 1961. Statistical study on the occurrence of aftershocks. *Geophysics*, 30: 521–605.

23. Utsu T., Ogata Y., Matsu'ura R.S. **1995.** The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. *J. of Physics of the Earth*, 43: 1–33. https://doi.org/10.4294/jpe1952.43.1

Об авторах

СЕМЕНОВА Елена Петровна (ORCID 0000-0002-7435-961Х), начальник сейсмической станции «Южно-Сахалинск», Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, semenova@seismo.sakhalin.ru

БОГИНСКАЯ Наталья Владимировна (ORCID 0000-0002-3126-5138), научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, fily77@mail.ru

КОСТЫЛЕВ Дмитрий Викторович (ORCID 0000-0002-8150-9575), начальник отдела сейсмических стационаров, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», младший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, d.kostylev@imgg.ru

УДК 550.34.038.8

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.486-499

Сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов на Сахалине и южных Курильских островах (о. Кунашир)

© 2020 Д. В. Костылев^{*1,2}, Н. В. Богинская²

¹Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия ²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: d.kostylev@imgg.ru

Резюме. В статье приведены основные характеристики и исследованы спектральные и регистрационные возможности трех типов экспериментальных образцов молекулярно-электронных гидрофонов с различными размерами электрохимической преобразующей ячейки, которые были установлены в центральной части юга о. Сахалин и на о. Кунашир (южная часть Курильской гряды) в конце 2018 г. На о. Кунашир апробирован гидрофон на новой технологической основе (с увеличенной, относительно ранее проводимых исследований, чувствительностью датчика). Оборудование подобного типа для наблюдений на территории Сахалинской области применялось впервые. В результате непрерывных сейсмоакустических наблюдений на о. Кунашир в 7 случаях из 35 исследованных (с 1.05.2019 по 29.02.2020) землетрясений обнаружен низкочастотный упреждающий сигнал (НУС), все 7 событий имели глубину гипоцентра больше 80 км. В районе Центрально-Сахалинского разлома кроме возможности регистрации НУС изучены спектральные особенности в записи волновых форм для разных условий установки приборов. Показано, что влияние такого атмосферного фактора, как ветровая нагрузка, значительно воздействует на гидрофоны, расположенные в мелководном водоеме и неглубокой открытой скважине. Однако молекулярно-электронные гидрофоны продемонстрировали способность вести полноценную регистрацию сейсмических событий независимо от условий установки приборов.

Ключевые слова: сейсмоакустические наблюдения, молекулярно-электронный гидрофон, спектральная плотность, сейсмические события, низкочастотный упреждающий сигнал

Seismoacoustic observations using molecular-electronic hydrophones on Sakhalin and the South Kuril Islands (Kunashir Island)

Dmitry V. Kostylev^{*1,2}, Natalya V. Boginskaya²

¹Sakhalin Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia ²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: d.kostylev@imgg.ru

Abstract. The article presents the main characteristics and studies spectral and recording capabilities of experimental samples of three types of molecular-electronic hydrophones with different sizes of electrochemical converting cells, which were installed in the central part of the south of Sakhalin Island and on Kunashir Island (southern part of the Kuril ridge) at the end of 2018. A hydrophone on a new technological basis (with an increased sensor sensitivity relative to previously conducted studies) was approved on Kunashir Island. Equipment of this type was used for observations on the territory of the Sakhalin region for the first time. As a result of continuous seismoacoustic observations on Kunashir Island, in seven cases out of 35 studied (from May 1, 2019 to February 29, 2020) earthquakes, a low-frequency anticipatory signal (LFAS) was detected, and all seven events had a depth of hypocenter of more than 80 km. In the area of the Central Sakhalin fault, in addition to the possibility of registering the LFAS, spectral features in the recording of waveforms were studied for different conditions of instrument installation. It is shown that the influence of such atmospheric factor as wind load significantly affects hydrophones located in a shallow water body and a shallow

open borehole. However, molecular-electronic hydrophones have demonstrated the ability to fully record seismic events regardless of the installation conditions of the equipment.

Keywords: seismoacoustic observations, molecular-electronic hydrophone, spectral density, seismic events, low-frequency anticipatory signal

Для цитирования: Костылев Д.В., Богинская Н.В. Сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов на Сахалине и южных Курильских островах (о. Кунашир). Геосистемы переходных зон, 2020, т. 4, № 4, с. 486–499. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.486-499

For citation: Kostylev D.V., Boginskaya N.V. Seismoacoustic observations using molecular-electronic hydrophones on Sakhalin and the South Kuril Islands (Kunashir Island). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 486–499. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.486-499

Благодарности и финансирование

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 18-07-00966А, «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности Сахалина с применением сейсмических датчиков нового типа».

Acknowledgements and Funding

This work was carried out with partial support from the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) No. 18-07-00966A, «Study of trigger deformation effects based on the data on Sakhalin's seismicity using a new type of seismic sensors».

Введение

Сейсмоакустические исследования сегодня востребованы в сейсморазведке, при оценке рисков в морском и прибрежном строительстве, в системах охраны акваторий и прочих океанографических наблюдениях. Не последнее место в этом списке занимает изучение сейсмических процессов с использованием гидроакустических систем. Как было ранее показано [Борисов и др., 2013], применение малогабаритных гидрофонных систем в условиях мелководья позволяет регистрировать региональные землетрясения, в том числе слабомагнитудные и глубокофокусные, локальные микроземлетрясения, производить оценку параметров землетрясений, фиксировать сигналы геоакустической эмиссии, выявлять напряженно-деформированные состояния геологических пород.

На о. Сахалин и Курильских островах гидроакустические озерные и сейсмические береговые наблюдения проводились в 2006–2012 гг. в районе Центрально-Сахалинского разлома о. Сахалин, а также на островах Кунашир и Шикотан [Борисов и др., 2012; Борисов, Борисов, 2017]. Наблюдения проводили при помощи гидрофонных автономных сейсмостанций, разработанных и изготовленных в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) для долговременного гидроакустического наблюдения за сейсмической активностью [Борисов и др., 2013].

Данные наблюдения носили преимущественно экспедиционный характер. Несмотря на большое количество помех при регистрации гидроакустических записей, удалось установить [Борисов и др., 2012], что слабые землетрясения уверенно регистрируются гидрофонными станциями. Также было показано [Борисов и др., 2012], что для некоторых слабых землетрясений характерно появление сверхкраткосрочного признака сейсмического события – низкочастотного упреждающего сигнала (НУС). Интересно, что зарегистрированные гидроакустические отклики в виде НУС хорошо видны на частоте 6 Гц, а продолжительность сигнала составляет примерно 3 % от общей продолжительности записи волновой формы.

В настоящей работе исследованы спектральные и регистрационные возможности трех типов гидрофонов в зависимости от их конструктивных особенностей. Гидрофоны 769 и 891 были установлены в совершенно разных условиях, что помогло выявить воздействие различных атмосферных факторов на работу оборудования. С использованием молекулярно-электронного гидрофона 770, предоставленного ООО «Р-сенсорс», на о. Кунашир проводились непрерывные гидроакустические наблюдения, которые позволили получить непротиворечивые данные сравнительно с более ранними исследованиями.

Широкополосные гидрофоны на основе молекулярно-электронного переноса для проведения сейсмоакустического мониторинга

Существуют различные технологии изготовления гидрофонов – датчиков, измеряющих вариации акустического давления. Наиболее распространены гидрофоны, основанные на электродинамическом, пьезоэлектрическом и магнитострикционном эффектах. Независимо от технологии, использованной при создании гидрофонов, возможности измерения слабых сигналов с помощью гидрофонов ограничены уровнем регистрируемых помех, не относящихся к полезному сигналу и представляющих, с точки зрения процессов измерения, шум. В настоящем исследовании представлены результаты практического опыта использования гидрофонов, созданных на основе молекулярно-электронного переноса заряда (МЭП) ООО «Р-сенсорс» в сотрудничестве с Центром молекулярной электроники Московского физико-технического института (МФТИ) [Зайцев и др., 2019]. Технология МЭП, успешно зарекомендовавшая себя в области сейсмологии

и геофизических исследований, нашла применение и при разработке датчиков давления, отличных от традиционных пьезокерамических, микромеханических и оптоволоконных. Отличительными особенностями датчиков на основе МЭП являются исключительно высокая чувствительность и низкий уровень собственных шумов в области инфранизких частот. Фундаментальные принципы работы систем на основе МЭП достаточно подробно изложены в литературе [Huang et al., 2013; Бугаев и др., 2018]. Основу любого устройства, работающего по технологии МЭП, составляет электрохимическая преобразующая ячейка.

Конструкция и основные принципы работы молекулярно-электронного гидрофона с отрицательной обратной связью показаны на рис. 1 [Zaitsev et al., 2018]. Электропакет, состоящий из набора сетчатых электродов, помещают в раствор электролита между упругими резиновыми мембранами внутри внешнего корпуса гидрофона. К одной из двух мембран прикреплен магнит, который может свободно перемещаться внутри катушки. Катушка жестко приклеена к верхней крышке. Технический результат достигается тем, что одна упругая мембрана имеет непосредственный контакт со средой, в которой распространяются акустические волны, а вторая ограничивает определенный замкнутый объем воздуха при заданном давлении.



Рис. 1. Конструкция и внешний вид молекулярно-электронного гидрофона [Zaitsev et al., 2018]. 1 – внешний корпус гидрофона, 2 – катушка, 3 – магнит, 4 – мембраны, 5 – электропакет, 6 – электрические клеммы анодов и катодов, 7 – раствор электролита, 8 – верхняя крышка.

Figure 1. Construction and appearance of a molecular-electronic hydrophone [Zaitsev et al., 2018]. 1 – outer case, 2 – coil, 3 – magnet, 4 – membranes, 5 – electrical package, 6 – electrical terminals of anodes and cathodes, 7 – electrolyte solution, 8 – upper cover.

Разработчиком, в соответствии с результатами математического моделирования, показано, что основным параметром, влияющим на характеристики молекулярно-электронных гидрофонов, является размер площади преобразующей электродной ячейки. Кроме размеров ячейки на эксплуатационные свойства гидрофонов оказывают влияние жесткость мембраны и величина гидродинамического сопротивления [Zaitsev et al., 2019].

Для проведения сейсмоакустических наблюдений на Сахалине и Курильских островах компанией «Р-сенсорс» были предоставлены три экспериментальных образца гидрофона, различающиеся размерами ячейки: 6 × 6 мм, 3 × 3 мм и 2 × 2 мм, а также жесткостью мембран (табл. 1).

В гидрофонах 769 и 770 изменение чувствительности происходит главным образом благодаря увеличению жесткости системы из-за постепенного сжатия воздушного пузыря, заключенного при атмосферном давлении в корпусе прибора во время его изготовления. Гидрофон 891 имеет принципиально другую конструкцию – расширительный объем заполнен силиконовой жидкостью, которая сжимается при возникновении давления, что позволяет сохранять статическое давление и обеспечивать работоспособность до 30 м. При этом жесткость мембраны не оказывает влияния на параметры гидрофона, поскольку значение объемного модуля упругости используемой силиконовой жидкости (полиметилсилоксана) выше значения жесткости мембраны. Для изготовленных образцов разработчик провел экспериментальную лабораторную проверку амплитудно-частотных характеристик и предоставил калибровочные данные по каждому образцу (рис. 2).

Из представленных данных видно, что в согласии с теоретическими моделями образец молекулярно-электронного гидрофона с узлом размером 2 × 2 мм в области высоких и низких частот имеет меньший спад амплитудно-частотной характеристики.



Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики образцов молекулярно-электронных гидрофонов с различным размером ячейки.

Figure 2. Amplitude-frequency characteristics of samples of molecular-electronic hydrophones with different cell sizes.

Уарактеристика	Номер образца				
Ларактеристика	769	770	891		
Площадь преобразующей электродной ячейки, мм	6 × 6	3 × 3	2 × 2		
Жесткость мембраны, Па/м ³	$34.6 \cdot 10^{10}$	$13.1 \cdot 10^{10}$	_		
Полоса пропускания, Гц	1–200	1–300	1–300		
Чувствительность, В/Па	0.0020	0.0020	0.0028		
Собственный шум, на 1 Гц (по отношению к 1 мкПа/√Гц)	65 дБ	65 дБ	50 дБ		
Глубина погружения	до 10 м	до 10 м	до 30 м		

Таблица 1. Сводная таблица с характеристиками экспериментальных образцов* *Table 1.* Summary table with characteristics of experimental samples*

*Согласно технической документации производителя.

*According to the technical documentation by the producer.

Примечание. Габариты всех гидрофонов: диаметр 33 мм, высота 47 мм; диапазон рабочих температур: -40...+65 °C. *Note.* All hydrophones dimensions: diameter 33 mm, height 47 mm; operating temperature range: -40...+65 °C.

Расположение и оснащение пунктов наблюдений

В качестве территории для исследования возможностей предоставленных гидрофонов были выбраны участок в центральной части юга о. Сахалин в районе Центрально-Сахалинского разлома и о. Кунашир, расположенный в южной части Курильских островов (рис. 3). На юге о. Сахалин проживает большая часть населения Сахалинской области, поэтому вопросы сейсмического мониторинга для этого района актуальны. Южные Курильские острова составляют часть Курило-Камчатской дуги, являющейся классическим примером субдукции Тихоокеанской литосферной плиты под материк, что обусловливает уровень сейсмичности региона – один из самых высоких на Земле.

Места размещения оборудования выбирали исходя из наличия инфраструктуры и приемлемых условий регистрации.

В районе Центрально-Сахалинского разлома в качестве мест установки гидрофонов были выбраны комплексный геофизический полигон ИМГиГ ДВО РАН в селе Петропавловское Анивского района [Kostylev et al., 2019] и пункт сейсмического мониторинга в составе локальной сети юга Сахалина Са-



Рис. 3. Районы сейсмоакустических исследований и места размещения пунктов наблюдений.

Figure 3. Areas of seismoacoustic research and location of observation points.

халинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) в урочище Загорское Долинского района [Семенова и др., 2018]. В первом случае для установки гидрофона на полигоне была построена специальная самообводняющаяся скважина глубиной 3.5 м. Скважина обсажена перфорированной пластиковой трубой 110 мм. Во втором случае установка гидрофона производилась в открытом водоеме (пруд размером 3 × 9 м) на глубине 0.5 м.

На о. Кунашир местом установки гидрофона послужил геодинамический полигон на базе сейсмической станции «Южно-Курильск» СФ ФИЦ ЕГС РАН. На территории полигона расположена наблюдательная скважина гидрогеодеформационного мониторинга № 2722 обособленного структурного подразделения «СахГРЭ» АО «Дальневосточное ПГО» глубиной 303.3 м, обсаженная на всю глубину [Демежко и др., 2009]. Гидрофон размещен в этой скважине на глубине 25 м в обсадной колонне диаметром 245 мм.

Таким образом, все точки сейсмоакустических наблюдений оборудованы как автономные пункты инструментальных наблюдений (ПИН), являющиеся частью полигонов комплексных геофизических наблюдений. Пример схемы оснащения полигона, с выделением в его составе оборудования автономных пунктов сейсмоакустических наблюдений, представлен на рис. 4. Полный перечень характеристик пунктов наблюдений приведен в табл. 2.

Для сбора данных на всех пунктах наблюдений использован регистратор сейсмических сигналов NDAS-8226 (URL: http://r-sensors. ru/ru/products/data loggers/ndas-8226 rus/) -24-разрядная система, преимущественно оптимизированная для автономной регистрации сейсмических данных в полевых условиях. Отличительные признаки системы - простота в использовании и надежность в сочетании с высокими техническими характеристиками. Для передачи данных и конфигурирования системы используются USB и Wi-Fi соединения; 32 Гб внутренней памяти позволяют вести длительную регистрацию данных в автономном режиме. Система оснащена высокоточным кварцевым генератором с привязкой к абсолютному времени с помощью GPS/ГЛОНАСС.

Характеристика	«Петропавловское» (PETR)	«Загорское» (ZGR)	«Южно-Курильск» (YUK)	
Номер гидрофона	769	891	770	
Координаты	46.789° N; 142.496° E	47.305° N; 142.489° E	44.035° N; 145.861° E	
Глубина установки, м	3.5	0.5	25	
Дата установки	24.10.2018	11.06.2020	27.04.2019	
Регистратор сейсмических сигналов	NDAS-8226 (s/n 4403)	NDAS-8226 (s/n 4410)	NDAS-8226 (s/n 4404)	
Система электропитания	Аккумулятор В.В.Вattery BP 5-12 (12V; 5 Ah). Зарядное устройство Сонар У3205.01	Аккумулятор Delta DT 1265 (12V; 65 Ah)	Аккумулятор CSB GP 1272 (12V, 7Ah). Зарядное устройство Сонар У3205.01	

Таблица 2. Характеристики пунктов	наблюдений
Table 2. Characteristics of observation	points

Электропитание пунктов, за исключением ПИН «Загорское», где отсутствует подключение к электрической сети, обеспечивается 12-вольтовым источником питания с внешним аккумулятором, что гарантирует работу комплекса в случае отключения электроэнергии. На ПИН «Загорское» используется герметизированный свинцово-кислотный аккумулятор емкостью 65 А×ч, обеспечивающий автономное электропитание комплекта (регистраторгидрофон) до 50 сут непрерывной работы.

Настройка параметров работы оборудования производится с использованием приложения NDAS, предназначенного для управления регистраторами серии NDAS. Приложение позволяет производить начальное конфигурирование устройства до начала работы, контроль состояния системы, запись сейсмических



Рис. 4. Оснащение комплексного геофизического полигона «Петропавловское». Красной рамкой выделено оборудование для сейсмоакустических наблюдений.

Figure 4. Equipment of the "Petropavlovskoe" complex geophysical test site. Equipment for seismoacoustic observations is shown within red frame.

сигналов на встроенный носитель – SD-карту, просмотр записываемой информации в реальном времени.

В соответствии с концепцией создания автономных пунктов инструментальных наблюдений организован удаленный доступ к регистрируемым данным, а также контроль и управление работой установленного оборудования. Для обеспечения удаленного доступа и управления работой регистрирующего оборудования используется Wi-Fi маршрутизатор с поддержкой 4G, который позволяет управлять работой системы через Интернет. Модеммаршрутизатор подключается к NDAS-8226 с помощью Wi-Fi-соединения, что позволяет ему быть расположенным независимо от местоположения регистратора. Работа с регистратором в режиме удаленного доступа производится через веб-интерфейс NDAS, который предназначен для конфигурирования устройств NDAS, в том числе, и на смартфонах и планшетах. Он позволяет производить те же операции, что и программа NDAS. В режиме удаленного доступа основными процедурами при работе с веб-интерфейсом являются контроль статуса и управление устройством, режим просмотра сигнала в реальном времени и доступ к каталогу FTP-сервера устройства. Доступ к FTPсерверу позволяет обеспечить получение информации с регистратора любым устройством, имеющим подключение к сети Интернет.

После введения комплектов регистрирующей аппаратуры в эксплуатацию для каждого ПИН было проведено исследование шумовых характеристик методом корреляционного анализа с последующим расчетом плотности мощностей шумовых сигналов в условиях, максимально приближенных к эталонным [Дрознин, Дрознина, 2010]. Для проведения расчетов были выбраны отрезки времени с низким уровнем сейсмического фона. Полученные результаты (рис. 5) подтверждают выводы разработчиков оборудования о том, что существенный вклад в шумы вносит жесткость системы, а размер узла приводит к снижению шума при увеличении гидродинамического сопротивления. Таким образом, подтверждена целесообразность снижения размеров пакета для снижения шумов и расширения частотной полосы в области высоких и низких частот.



Рис. 5. Спектральная плотность мощности шумового сигнала (децибеллы по отношению к мкПа²/Гц) гидрофонов пунктов инструментальных наблюдений.

Figure 5. Power spectral density of the noise signal (decibels in relation to $\mu Pa^2/Hz$) of hydrophones of instrumental observation points.

Результаты наблюдений ПИН «Южно-Курильск» (остров Кунашир)

Сейсмоакустические наблюдения в ПИН «Южно-Курильск» проводятся с 2019 г. Практически сразу в потоке сейсмоакустической эмиссии удалось выделить вариации, связанные с суточным, приливным, атмосферным и ионосферным факторами [Костылев, Богинская, 2019]. Не менее интересным представляется направление поиска геофизических сигналов, которые могли бы использоваться в качестве краткосрочных предвестников перед сейсмическими событиями на Дальнем Востоке.

В работе [Борисов и др., 2012] были выполнены гидроакустические наблюдения и изучены связи регистрируемых сигналов со слабой сейсмичностью в районе Южных Курильских островов. Заметной корреляции между геоакустической эмиссией и слабыми землетрясениями выявлено не было. Предположение о существовании перед слабыми землетрясениями низкочастотного упреждающего сигнала (НУС, сейсмоакустический отклик на подвижку геологического массива перед сейсмическим разрывом) нашло подтверждение лишь в некоторых случаях.

Для проведения исследований в данном аспекте авторами была выбрана прямоугольная область с координатами от 43.0° до 45.0° N и от 145.0° до 147.0° Е. Выборка событий

в этой области, согласно бюллетеню сейсмической станции «Южно-Курильск», составила 18 землетрясений с M ≥ 4.0 за период с 1 мая 2019 г. по 29 февраля 2020 г. Также исследовалась область в R = 40 км от места установки гидрофона, количество событий с M > 2.0 в ней составило 17 за аналогичный период времени. Глубины гипоцентров варьировали от 16 до 147 км. Из 35 зарегистрированных землетрясений в 7 случаях был выявлен НУС. Все 7 событий имели глубину гипоцентра более 80 км и располагались преимущественно в Южно-Курильском проливе. На рис. 6 показано расположение эпицентров землетрясений, пять из которых имеют четко выраженный акустический сигнал частотой 5 Гц и продолжительностью от 3 до 13 с. На двух землетрясениях сигнал не столь выражен, но его частота совпадает с частотой идентифицированных нами упреждающих сигналов.

На рис. 7 представлена в виде примера запись волновых форм землетрясений, произошедших 14.10.2019 и 18.12.2019, а также частотные характеристики самих сигналов и сейсмических событий. Систематизируем полученные нами на о. Кунашир результаты.

Низкочастотный упреждающий сигнал выявлен нами в 20 % случаев от общего количества сейсмических событий и для половины числа глубокофокусных землетрясений (с глубиной более 80 км). НУС имел место практиче-





Figure 6. Seismic events with an identified anticipatory signal.



Рис. 7. Примеры записи сейсмических событий с упреждающим сигналом и спектральный анализ (с выделением по вертикальной оси степени корреляции) упреждающего сигнала и сейсмического события по записям, построенный как функция автокорреляции сигнала в программном комплексе ДИМАС [Дрознин, Дрознина, 2010]. A – 14.10.2019, B – 18.12.2019.

Figure 7. An example of seismic events recording with anticipatory signal and spectral analysis (with the degree of correlation highlighted along the vertical axis) of the anticipatory signal and seismic event from the records, built as a function of signal autocorrelation in the DIMAS software package [Droznin, Droznina, 2010]. A - 14.10.2019, B - 18.12.2019.

ски для каждого второго такого события. Несмотря на то что НУС связывают в основном с коровыми землетрясениями, происходящими на дне океана в зонах субдукции, подобные сигналы в некоторых случаях отмечены и перед глубокофокусными событиями [Сасорова, 2005].

Параметры выделенных низкочастотных колебаний (период, амплитуда, частота сигнала, время упреждения и структура самого сигнала) варьируют незначительно. Период колебаний составил 0.2 с, колебания появляются за 3–13 с до прихода *P*-волны, их можно наблюдать на сейсмических записях без предварительного фильтра. Сходство параметров можно объяснить тем, что землетрясения с очагами в пределах одного региона характеризуются незначительным разбросом параметров НУС [Сасорова, 2005].

ПИН «Петропавловское» и «Загорское» (район Центрально-Сахалинского разлома)

Некоторые результаты наблюдений с помощью гидрофона ПИН «Петропавловское» были

представлены ранее [Каменев и др., 2019]. В 2020 г. аналогичные исследования проведены для гидрофона новой модификации, размещенного в ПИН «Загорское». Для анализа регистрационных возможностей нового гидрофона, ИХ сравнения с гидрофоном ПИН «Петропавловское», а также для выявления особенностей их работы в качестве источника информации о сейсмических событиях в районе исследования был использован каталог землетрясений по данным локальной сети СФ ФИЦ ЕГС РАН за период с 11 июня по 30 сентября 2020 г. в квадрате, ограниченном 46.7-47.5° N и 142.2-142.7° Е. Каталог включает в себя 31 сейсмическое событие с M = 1.8–3.4. Для временного интервала каждого

сейсмического события из архива волновых форм регистратора сейсмических сигналов NDAS-8226 были выделены соответствующие записи, обработку которых провели в программном комплексе DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2010]. Для удобства обработки сейсмологических материалов использовали различные виды фильтров. По результатам обработки установлено, что из 31 землетрясения четкая запись вступлений имеется у 14 событий по записям волновых форм ПИН «Петропавловское» и для 22 событий по записям ПИН «Загорское». Результаты анализа регистрационных возможностей ПИН показаны на рис. 8, иллюстрирующем пространственное распределение зарегистрированных комплексами событий в зависимости от их магнитуд и расположения эпицентров. Сейсмические события, уверенно зарегистрированные ПИН, показаны цветными маркерами, а неидентифицированные на записях гидрофонов – полупрозрачными маркерами.

Из представленного рисунка видно, что при совместном использовании гидрофонов ПИН



Рис. 8. Регистрационные возможности гидрофонов ПИН «Петропавловское» (А) и ПИН «Загорское» (В).

Figure 8. Registration capabilities of hydrophones of the "Petropavlovskoe" (A) and "Zagorskoe" (B) instrumental observation points.

«Петропавловское» и ПИН «Загорское» регистрируются 93.5 % сейсмических событий с M ≥ 1.8 в районе исследований. При этом ПИН «Петропавловское» уверенно регистрирует сейсмические события с M ≥ 2.5 в радиусе до 30 км от места установки, а ПИН «Загорское» – на расстоянии более 50 км, что объясняется гораздо более низким уровнем техногенных помех в месте установки оборудования ПИН «Загорское», а также усовершенствованной конструкцией используемого гидрофона. Различия в конструкции гидрофонов, очевидно, вносят специфику и в формы записей и характеристики регистрируемых событий. На рис. 9 отображены типичные варианты регистрации на примере наиболее сильных сейсмических событий, произошедших за исследуемый период на примерно одинаковом удалении (10-15 км) от пунктов наблюдений. Для ПИН «Петропавловское» это сейсмическое событие 03.07.2020 (M = 3.4), а для ПИН «Загорское» – событие 12.06.2020 (М = 3.2). Указанные сейсмические события выделены на рис. 8.

Видно, что для гидрофона, расположенного в обводненной скважине («Петропавловское»), регистрация сейсмического события характеризуется спектром с более высокими частотами колебаний (20 Гц), а регистрация сейсмических событий гидрофоном в открытом водоеме при практически полном отсутствии техногенных помех происходит на частотах до 10 Гц.

Влияние атмосферных факторов

На практике, в условиях автономных ПИН, на работу гидрофонов оказывают воздействие атмосферные явления, степень влияния которых определяется, в том числе, и способом установки гидрофона. Для гидрофона, установленного в глубокой скважине (Южно-Курильск), была проведена оценка влияния на работу гидрофона атмосферных параметров (таких как уровень атмосферного давления и значения уровня воды в скважине) по следующей методике: для записей волновых форм продолжительностью 7 сут построена усредненная огибающая сигнала, которая была дополнена информацией об уровнях давления и уровне воды в скважине в месте установки гидрофона. Из рис. 10 очевидно, что изменение давления и уровня воды не оказывают существенного влияния на работу прибора. На рисунке выделяются только суточные изменения уровня сигнала гидрофона, связанные с техногенной активностью в дневное время, особенно характерные для середины рабочей недели.

Для гидрофонов, работающих в более «жестких» условиях (мелководном водоеме и неглубокой открытой скважине), влияние природных факторов более значительно. В 2020 г. проведена оценка воздействия уровня осадков и ветровой нагрузки на работу гидрофонов в открытом водоеме (ПИН «Загорское») и неглубокой скважине (ПИН «Петропавловское») в период прохождения тайфуна «Хагупит» 7 августа



Рис. 9. Форма и спектральная составляющая частоты (с выделением по вертикальной оси степени корреляции) регистрируемых сейсмических событий для ПИН «Петропавловское» (А) и ПИН «Загорское» (В).

Figure 9. Waveform and spectral component of the frequency (with the degree of correlation highlighted along the vertical axis) of recorded seismic events of the "Petropavlovskoe" (A) and "Zagorskoe" (B) instrumental observation points.



Рис. 10. Соотношения уровня атмосферного давления по данным метеостанции «Южно-Курильск» (вверху) и уровня воды в скважине с установленным гидрофоном (по данным уровнемера гидростатического «Кедр-ДМ» ОСП «СахГРЭ», http://www.geomonitoring.ru/download/IB/2018_dfo.pdf) и огибающей сигнала гидрофона.

Figure 10. The ratio of the atmospheric pressure level according to the Yuzhno-Kurilsk meteorological station (above) and the water level in the well with the installed hydrophone (according to the hydrostatic level gauge Kedr-DM OSP SakhGRE, http://www.geomonitoring.ru /download/IB/2018_dfo.pdf) and hydrophone signal envelope.

(Долинская правда, № 33, 14 авг. 2020 г.). Тайфун оказал сильное влияние на районы установки ПИН. Так, по данным ближайших к пунктам наблюдений метеостанций, в Долинском районе (ПИН «Загорское») за 12 ч

выпало 73 мм осадков, а порывы ветра достигали 15 м/с, а в Анивском районе (ПИН «Петропавловское») – 51 мм осадков, порывы ветра до 10 м/с. Результат расчета мощности спектральной плотности сигналов в момент прохождения тайфуна и через двое суток после его окончания представлен на рис. 11.

Очевидно значительное влияние воздействия тайфуна на гидрофон в открытом водоеме (Б) на частотах до 1 Гц. При этом влияние тайфуна на гидрофон в скважине (А) проявляется в меньшей степени, но в большем частотном диапазоне 0.1–10 Гц.

Исследование влияния атмосферных факторов на работу гидрофонов позволит в дальнейшем выработать оптимальные инженерно-конструкторские решения, позволяющие минимизировать воздействие окружающей среды. При этом совместный анализ сейсмоакустических и других



Рис. 11. Спектральная плотность сейсмического шума (децибеллы по отношению к мкПа²/Гц) на ПИН «Петропавловское» (А) и ПИН «Загорское» (В) в период прохождения тайфуна (красный цвет) – 7 августа 2020 г. и после окончания выпадения осадков – 9 августа 2020 г. (синий цвет). Figure 11. Spectral density of seismic noise (decibels in relation to μ Pa²/Hz) of the «Petropavlovskoe» (A) and «Zagorskoe» (B) instrumental observation points during the typhoon passage (red) – August 7, 2020 and after the end of precipitation – August 9, 2020 (blue).

геофизических данных (включая возмущения, связанные с циркуляцией атмосферы, магнитными бурями и солнечной активностью) может быть направлен на разработку методик краткосрочных заключений по развитию сейсмического режима на о. Сахалин и в районе Южных Курильских островов.

Заключение

В статье представлены результаты сейсмоакустических наблюдений на островах Сахалин и Кунашир с помощью молекулярно-электронных гидрофонов. Несмотря на неизбежное влияние на работу оборудования техногенных и атмосферных факторов, выбор мест и способов установки оборудования следует признать удачным. Опыт эксплуатации молекулярноэлектронных гидрофонов показал соответствие характеристик, полученных в результате практических наблюдений, характеристикам, заявленным производителем.

В используемых для сейсмоакустических наблюдений приборах (регистраторе и гидрофоне) отсутствуют элементы точной механики и движущихся механических частей, что гарантирует их высокую надежность и устойчивость к нежелательным внешним воздействиям. Это подтверждается опытом применения этих приборов на пунктах наблюдений. Несмотря на достаточно жесткие условия эксплуатации – 100%-ю влажность в летний период для Южно-Курильска и температуры –5...–10 °С в зимний период, используемый комплект оборудования показал, в целом, очень высокую степень надежности. Простои регистрации составили не более 0.01 % от времени работы комплекса.

Анализ записей с гидрофонной станции на о. Кунашир выявил в 20 % случаев из 35 зарегистрированных землетрясений наличие низкочастотного упреждающего сигнала – перед глубокофокусными землетрясениями (глубина гипоцентра больше 80 км). Частотный диапазон идентифицированных сигналов составляет в среднем 4–6 Гц, а продолжительность сигнала варьирует от 3 до 13 с.

Наблюдения в зоне Центрально-Сахалинского разлома показали, что молекулярноэлектронные гидрофоны позволяют не только зафиксировать такой геофизический параметр, как низкочастотный упреждающий сигнал, но и вести полноценную регистрацию сейсмических событий независимо от условий установки приборов.

Изучение реакции молекулярно-электронных гидрофонов на воздействие внешних факторов может быть полезным для разработчиков при создании серийного изделия. Так, образец 891 (ПИН «Загорское») послужил основой для серийного продукта компании «Р-сенсорс» (гидрофон MTAS-30).

Список литературы

1. Борисов А.С., Борисов С.А. **2017.** Оценка параметров гидроакустических сигналов высокочастотной геоакустической эмиссии в районе Центрально-Сахалинского разлома. *Геосистемы переходных зон*, (3): 64–70. doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.064-070

2. Борисов А.С., Борисов С.А., Левин Б.В., Сасорова Е.В. **2012.** Наблюдения слабых землетрясений гидрофонной станцией на мелководье южных Курильских островов. *Геодинамика и тектонофизи*ка, 3(2): 103–113. https://doi.org/10.5800/gt-2012-3-2-0065

3. Борисов А.С., Борисов С.А., Гурский В.В. **2013.** Гидрофонные автономные сейсмостанции в задаче детальных сейсмологических наблюдений. В кн.: *IV науч.-технич. конф. «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», 30 сент. – 4 окт. 2013, Петропавловск-Камчатский.* Петропавловск-Камчатский: Камчат. фил. Геофиз. службы РАН, т. 1: 313–317. URL: http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/techn/Borisov etc.pdf

4. Бугаев А.С., Антонов А.Н., Агафонов В.М., Белотелов К.С., Вергелес С.С., Дудкин П.В., Егоров Е.В., Егоров И.В., Жевненко Д.А. и др. **2018.** Измерительные приборы на основе молекулярно-электронных преобразователей. *Радиотехника и электроника*, 63(12): 1249–1262.

5. Демежко Д.Ю., Рывкин Д.Г., Юрков А.К., Дергачев В.В., Корсунцев В.Г. **2009.** Комплексные геотермические исследования в скважине kun-1 (о. Кунашир). Ч. I: Вертикальное распределение температур, тепловой поток, влияние рельефа, гидрогеологии, распространение суточных волн. *Уральский геофизический вестник*, 1(14): 18–29.

6. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. **2010.** Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS. *Сейсмические приборы*, 46(3): 22–34.

7. Зайцев Д.Л., Егоров Е.В., Авдюхина С.Ю., Рыжков М.А. **2019.** Молекулярно-электронный гидрофон: патент RU 2678503 C1. № 2017146249; заявл. 27.12.2017; опубл. 29.01.2019.

8. Каменев П.А., Костылев Д.В., Богинская Н.В., Закупин А.С. **2019.** Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования. *Геосистемы переходных зон,* 3(4): 390–402. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402

9. Костылев Д.В., Богинская Н.В. **2019.** Об опыте использования молекулярно-электронных сейсмических датчиков на Сахалине и Южных Курилах. В кн.: *VII науч.-технич. конф. «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», 29 сент. – 5 окт. 2019, Петропавловск-Камчатский*. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, т. 1: 455–458. URL: http://www.emsd.ru/ conf2019lib/pdf/techn/kostilev.pdf

10. Сасорова Е.В. **2005.** Особенности разномасштабных пространственно-временных проявлений сейсмического процесса в Тихоокеанском регионе: наблюдения, статистика, моделирование: *дис. ... д-ра физ.-мат. наук.* М., Институт океанологии РАН, 342 с.

11. Семенова Е.П., Костылев Д.В., Михайлов В.И., Паршина И.А., Ферчева В.Н. **2018.** Оценка сейсмичности Южного Сахалина по методике СОУС'09. *Геосистемы переходных зон*, 2(3): 191–195. doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.191-195

12. Huang H., Agafonov V., Yu H. **2013.** Molecular electric transducers as motion sensors: a review. *Sensors*, 13(4): 4581–4597. https://doi.org/10.3390/s130404581

13. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. **2019.** About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324(012009). https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012009

14. Zaitsev D.L., Avdyukhina S.Y., Ryzhkov M.A., Evseev I., Egorov E.V., Agafonov V.M. **2018.** Frequency response and self-noise of the met hydrophone. *J. of Sensors and Sensor Systems*, 7(2): 443–452. https://doi.org/10.5194/jsss-7-443-2018

15. Zaitsev D., Egorov E., Ryzhkov M., Velichko G., Gulenko V. **2019.** Low-frequency, low-noise molecularelectronic hydrophone for offshore and transit zone seismic exploration. In: *19-th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 28 June – 7 July 2019, Albena, Bulgaria*: Conf. proceedings, vol. 1: 961–968.

References

1. Borisov A.S., Borisov S.A. **2017.** Estimation of parameters of hydroacoustic signals of high frequency geoacoustic emission within Central Sakhalin Fault area. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, (3): 64–70. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.064-070

2. Borisov A.S., Borisov S.A., Levin B.W., Sasorova E.V. **2012.** Hydroacoustic observations of weak earthquakes in shallow waters of the Southern Kuril Islands. *Geodynamics & Tectonophysics*, 3(2): 103–113. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/gt-2012-3-2-0065

3. Borisov A.S., Borisov S.A., Gurskiy V.V. **2013.** [Autonomous hydrophone seismic stations in the task of detailed seismic observations]. In.: *IV nauch.-tekhnicheskaya konf. «Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii». 30 sent. – 4 okt. 2013, Petropavlovsk-Kamchatskiy [IV scientific and technical conference "Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East", 29 Sept. – 5 Oct. 2013, Petropavlovsk-Kamchatskiy].* Petropavlovsk-Kamchatskiy: Kamchatskiy: Kamcha

4. Bugaev A.S., Antonov A.N., Agafonov B.M., Vergeles S.S., Dudkin P.V., Egorov E.V., Egorov I.V., Zhevnenko D.A., Zhabin S.N. et al. **2018.** Measuring devices based on molecular-electronic transducers. *J. of Communications Technology and Electronics*, 63(12): 1339–1351. https://doi.org/10.1134/s1064226918110025

5. Demezhko D.Yu., Ryvkin D.G., Yurkov A.K., Dergatchev V.V., Korsuntsev V.G. **2009.** Complex geothermal investigations in the borehole kun-1 (Kunashir Island). Pt. 1: Vertical temperature distribution, heat flow, topography and hydrogeology influence, diurnal wave propagation. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik* [*Ural Geophysical Bulletin*], 1(14): 18–29. (In Russ.).

6. Droznin D.V., Droznina S.Y. **2011.** Interactive DIMAS program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 47(3): 215–224. https://doi.org/10.3103/s0747923911030054

7. Zaytsev D.L., Egorov E.V., Avdyukhina S.Yu., Ryzhkov M.A. **2019.** *Molekulyarno-elektronnyy gidrofon* [*Molecular electronic hydrophone*]: patent RU 2678503 C1. № 2017146249; appl. 27.12.2017; publ. 29.01.2019. (In Russ.).

8. Kamenev P.A., Kostylev D.V., Boginskaya N.V., Zakupin A.S. **2019.** Geophysical surveys in the southern part of the Central Sakhalin Fault based on new integrated network. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 390–402. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402

9. Kostylev D.V., Boginskaya N.V. **2019.** [On the experience of using molecular-electronic seismic sensors on the Sakhalin and South Kuriles]. In: *VII nauch.-tekhnich. konf. «Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii», 29 sent. – 5 okt. 2019, Petropavlovsk-Kamchatskiy [VII scientific and technical conference "Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East", 29 Sept. – 5 Oct. 2019]. Petropavlovsk-Kamchatskiy: KF FITs EGS RAN [KB FRC UGS RAS], vol. 1: 455–458. (In Russ.). URL: http://www.emsd.ru/conf2019lib/pdf/techn/kostilev.pdf*

10. Sasorova E.V. **2005.** Osobennosti raznomasshtabnykh prostranstvenno-vremennykh proyavleniy seysmicheskogo protsessa v Tikhookeanskom regione: nablyudeniya, statistika, modelirovanie [Features of different-scale space-time manifestations of the seismic process in the Pacific region: observations, statistics, simulation]: [dissertation of doctor of physical and mathematical sciences]. Moscow, P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, 342 p. (In Russ.).

11. Semenova E.P., Kostylev D.V., Mikhailov V.I., Parshina I.A., Fercheva V.N. **2018.** Evaluation seismicity in Southern Sakhalin with the use of the method SOUS'09. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 191–195. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.191-195

12. Huang H., Agafonov V., Yu H. **2013.** Molecular electric transducers as motion sensors: a review. *Sensors*, 13(4): 4581–4597. https://doi.org/10.3390/s130404581

13. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. **2019.** About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type. In: *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324(012009). https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012009

14. Zaitsev D.L., Avdyukhina S.Y., Ryzhkov M.A., Evseev I., Egorov E.V., Agafonov V.M. **2018.** Frequency response and self-noise of the met hydrophone. *J. of Sensors and Sensor Systems*, 7(2): 443–452. https://doi.org/10.5194/jsss-7-443-2018

15. Zaitsev D., Egorov E., Ryzhkov M., Velichko G., Gulenko V. **2019.** Low-frequency, low-noise molecularelectronic hydrophone for offshore and transit zone seismic exploration. In: *19-th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 28 June – 7 July 2019, Albena, Bulgaria*: Conf. proceedings, 1: 961–968.

Об авторах

КОСТЫЛЕВ Дмитрий Викторович (ORCID 0000-0002-8150-9575), начальник отдела сейсмических стационаров, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», младший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, d.kostylev@imgg.ru

БОГИНСКАЯ Наталья Владимировна (ORCID 0000-0002-3126-5138), научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, fily77@mail.ru УДК 551.21

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.500-505

Активизация вулкана Эбеко в мае-июле 2020 г. (о. Парамушир, Северные Курилы)

© 2020 А. В. Дегтерев*, М. В. Чибисова

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: d a88@mail.ru

Резюме. Вулкан Эбеко, расположенный в северной части о. Парамушир (Северные Курильские о-ва), на сегодняшний день является наиболее активно действующим вулканом Курильской островной дуги: с 2016 г. продолжается очередное эксплозивное извержение, протекающее в форме регулярных пепло-газовых выбросов умеренной силы. Всего в период с января 2018 по октябрь 2020 г. зафиксировано не менее 1834 выбросов (в светлое время суток и при хороших погодных условиях). В мае–июле 2020 г. наблюдалось существенное усиление эруптивной деятельности вулкана, проявлявшееся в резком увеличении частоты и высоты выбросов. За этот период было зафиксировано 296 выбросов, из которых 90 на высоту 3 км и более.

Ключевые слова: Курильские острова, вулкан Эбеко, пепел, извержение, мониторинг вулканической активности

Activation of the Ebeko volcano in May–July, 2020 (Paramushir Island, Northern Kuril Islands)

Artem V. Degterev*, Marina V. Chibisova

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: d a88@mail.ru

Abstract. The Ebeko volcano located in the northern part of Paramushir Island (Northern Kuril Islands), is currently the most active volcano of the Kuril Island arc: since 2016, next explosive eruption has continued, proceeding in the form of regular ash-gas explosions of moderate force. In the period from January 2018 to October of 2020 a total of at least 1834 emissions were recorded (during daylight hours and under good weather conditions). In May–July 2020, the intensification of the eruptive activity of the volcano was observed, that manifested in a sharp increase of the emissions frequency and height. During this period, 296 emissions were recorded, 90 of which were at an altitude of 3 km or more.

Keywords: Kuril Islands, the Ebeko volcano, ash, eruption, volcanic activity monitoring

Для цитирования: Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Активизация вулкана Эбеко в мае–июле 2020 г. (о. Парамушир, Северные Курилы). Геосистемы переходных зон, 2020, т. 4, № 4, с. 500–505. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.500-505

For citation: Degterev A.V., Chibisova M.V. Activation of the Ebeko volcano in May–July, 2020 (Paramushir Island, Northern Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 500–505. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.500-505

Благодарности и финансирование

Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам за конструктивную критику.

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

Acknowledgements and Funding

Authors are grateful to the reviewers for constructive criticism.

The work is carried out within the framework of state assignment Federal state budgetary institution of science Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS.

Введение

Вулкан Эбеко (абс. выс. – 1156 м), расположенный в северной части о. Парамушир (рис. 1) (Северные Курильские о-ва), на сегодняшний день является наиболее активно действующим вулканом Курильской островной дуги: с 2016 г. продолжается очередное эксплозивное извержение, протекающее в форме регулярных пепло-газовых выбросов умеренной силы. В 7 км к восток-юго-востоку от вулкана расположен г. Северо-Курильск (рис. 1) – административный центр Северо-Курильского городского округа, с численностью населения 2593 чел. (по данным на 01.01.2020 г. – https:// sakhalin.gov.ru/index.php?id=684), функционируют объекты инфраструктуры (в т.ч. морской порт, вертодром). Кроме того, в ближайшее время планируется возведение взлетно-посадочной полосы, которая позволит улучшить транспортное сообщение острова с материком. Учитывая опасность потенциальных извержений влк. Эбеко для населения и хозяйственных объектов, важной практической задачей является постоянный оперативный мониторинг его активности.



Рис. 1. Географическое положение влк. Эбеко. **Figure 1.** Geographical location of the Ebeko volcano.

В настоящее время Сахалинской группой реагирования на вулканические извержения (SVERT) для наблюдения за вулканом используются данные IP-камеры AXIS (0526-001), установленной в октябре 2017 г. на территории Северо-Курильска Камчатским филиалом ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» совместно с Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН. Изображения обновляются каждые 2 мин, что при благоприятных погодных условиях и в светлое время суток позволяет регистрировать все выбросы и своевременно информировать о них заинтересованные организации. В ночное время, а также при недостаточной видимости из-за облачности, тумана, интенсивных осадков с ветром взрывы фиксировать не удается. Спутниковые данные, как показала практика, малопригодны для отслеживания эксплозий влк. Эбеко ввиду их кратковременности, небольшой высоты и неблагоприятных погодных условий.

В мае-июле 2020 г. нами установлено существенное усиление эруптивной деятельности вулкана, проявлявшееся в резком увеличении частоты и высоты выбросов: количество эксплозий на высоту более 3 км над ур. м. было максимальным за 2018–2020 гг. Настоящее сообщение посвящено рассмотрению особенностей данной активизации.

Общие сведения о вулкане Эбеко

Вулкан Эбеко относится к вулканическим образованиям линейно-гнездового типа [Федорченко и др., 1989]: он сформирован несколькими слившимися между собой разновозрастными конусами, образующими вытянутый с севера на юг стратовулкан высотой ~200 м, насаженный на северную часть хр. Вернадского [Горшков, 1967; Меняйлов и др., 1992]. Вершина вулкана увенчана тремя крупными (диаметром от 284 до 304 м [Walter et al., 2020]), соприкасающимися между собой кратерами (Северный, Средний, Южный) и серией боковых эксплозивных кратеров и воронок взрыва. В северо-восточном секторе

Северного кратера расположен Новый Северный кратер диаметром 211 м, начавший формироваться в апреле 2018 г. [Котенко и др., 2018; Фирстов и др., 2020b; Walter et al., 2020]. Продукты активности вулкана представлены андезибазальтами и андезитами [Горшков, 1967; Федорченко и др., 1989]. За историческое время зафиксировано не менее 10 извержений влк. Эбеко: 1793, 1833–1834, 1859, 1934–1935, 1963, 1965, 1967–1971, 1987–1991, 2009, 2010-2011 гг. [Горшков, 1967; Котенко и др., 2007; Котенко и др., 2010; Меняйлов и др., 1992]. Все они были эксплозивными, имели преимущественно фреатический (фреато-магматический) механизм и происходили из различных центров, локализованных преимущественно в пределах Северного и Среднего кратеров.

Характерной чертой современного этапа активности влк. Эбеко является значительная продолжительность большинства его извержений – от 2 до 4 лет. Кроме того, для влк. Эбеко, как и для подавляющего числа андезитовых вулканов, характерна интенсивная газо-гидротермальная активность: в кратерах и на склонах вулканической постройки расположено множество сольфатар и термальных источников. Интенсивная эруптивная и сольфатарно-гидротермальная деятельность вулкана объясняется существованием долгоживущей гидротермально-магматической системы в пределах хр. Вернадского [Меняйлов и др., 1992; Рычагов и др., 2002].

Активизация вулкана Эбеко в 2020 г.

В октябре 2016 г. началось очередное эксплозивное извержение влк. Эбеко, продолжающееся вплоть до сегодняшнего дня в виде регулярных пепло-газовых выбросов умеренной силы [Дегтерев, Чибисова, 2020; Котенко и др., 2018; Фирстов и др., 2020а]. На протяжении всего времени группа SVERT осуществляла оперативный мониторинг активности влк. Эбеко, используя визуальные и спутниковые данные [Рыбин и др., 2018]. В период с января 2018 по октябрь 2020 г. (в светлое время суток и при хороших погодных условиях), по нашим данным, зафиксировано не менее 1834 выбросов. Высота пепло-газового столба составляла 1-3 (до 5.5) км над ур. м., пепловые шлейфы распространялись в среднем на 5–10 км [Дегтерев, Чибисова, 2020]. При этом в окрестностях Северо-Курильска неоднократно наблюдались пеплопады и регистрировалось превышение предельно допустимых концентраций SO₂ и H₂S [Котенко и др., 2018; Фирстов и др., 2020а].

В 2020 г. характер эруптивной деятельности влк. Эбеко принципиально не изменился: продолжали происходить частые пепло-газовые выбросы (рис. 2) фреатической природы из жерл, локализованных в Новом Северном кратере [Котенко и др., 2018; Фирстов и др., 2020b]. Высота выбросов варьировала от 1.5 до 5 км над ур. м., дальность разноса пепловых облаков в среднем не превышала 10 км.

В период с мая по июль 2020 г. был зафиксирован резкий рост общего количества наблюдаемых эксплозий (рис. 3), что особенно отчетливо проявилось в распределении выбросов на высоту более 3 км над ур. м. Так, если в апреле было зарегистрировано 21 событие, то в мае их количество выросло уже до 93, увеличившись, таким образом, более чем в 4.5 раза (рис. 3). Далее на протяжении 3 мес. сохранялась максимальная за рассматриваемый период частота эксплозий: в среднем не менее 3 выбросов в день, при этом из них один на высоту 3 км и более (рис. 3). В июле было зафиксировано 115 взрывов, что стало максимальным значением для 2020 г. (рекордное значение за весь период наблюдений было зарегистрировано за сентябрь 2018 г. – 133 события) (рис. 4 a, b). Пепловые облака распространялись преимущественно в южном, юго-восточном и северовосточном направлениях

Следует отметить, что ранее в работе [Фирстов и др., 2020b] на основе изучения напряженности электрического поля атмосферы в районе вулкана и визуальных данных был также сделан вывод о начале активизации вулкана начиная с 29 апреля 2020 г.

Сравнивая количественные показатели выбросов на высоту 3 км и более в разные годы, можно видеть, что период с мая по июль 2020 г. характеризовался максимальными значениями: на протяжении 3 мес. подряд фиксировалось от 26 до 35 взрывов (рекордным за весь период наблюдений стал июнь – 35 выбросов). Очень схожий, приближенный по количеству выбросов, но более продолжительный период наблюдался в 2018 г. (рис. 4).

Изучение характера распределения количества эксплозий за 2018–2020 гг. указывает на то, что наибольшее количество взрывов на



Рис. 2. Эксплозивная активность влк. Эбеко: (a) 04.05.2020, (b) 24.05.2020 (c) 01.07.2020 (d) 03.07.2020. Снимки с IP-камеры AXIS (0526-001).

Figure 2. Explosive activity of the Ebeko volcano: (a) 04.05.2020, (b) 24.05.2020 (c) 01.07.2020 (d) 03.07.2020 Images from the IP-camera AXIS (0526-001).



Рис. 3. Распределение количества эксплозий (общее количество и выбросы выше 3 км над ур. м.) по месяцам за период с января по октябрь 2020 г.

Figure 3. Distribution of the number of explosions (total amount and emissions above 3 km a.s.l.) by months during the period from January to October 2020.

вулкане происходит в период с мая по ноябрь, при этом максимальные значения характерны именно для летних месяцев, особенно наглядно это проявляется для событий на высоту 3 км и более. Природа подобных вариаций, по-видимому, связана с сезонной динамикой поступления и перераспределения воды в гидротермально-магматической системе хр. Вернадского – одного из важнейших компонентов, обеспечивающего интенсивную работу влк. Эбеко.



Рис. 4. Распределение по месяцам общего количества выбросов (а) и на высоту 3 км и более над ур. м. (b) за период с января 2018 по октябрь 2020 г.

Figure 4. Distribution of the total amount of emissions (a) and at an altitude of 3 km a.s.l. or more (b) for the period from January 2018 to October 2020.

Выводы

1. В период с мая по июль 2020 г. на фоне продолжающегося с октября 2016 г. эксплозивного извержения наблюдалось существенное усиление активности влк. Эбеко, выражающееся в увеличении частоты и высоты выбросов. Пепловые облака, формирующиеся в результате вулканических эксплозий, представляли определенную опасность для инфраструктуры и населения г. Северо-Курильск.

2. Практика ежедневного мониторинга показала, что данные камеры видеонаблюдения, несмотря на определенные ограничения, связанные с погодными условиями и использованием в ночное время, позволяют оперативно отслеживать проявления эксплозивной активности влк. Эбеко. Принимая во внимание высокую потенциальную опасность, а также возможность существенного усиления интенсивности извержения, необходимо совершенствование методов мониторинга вулканической активности, включая геофизические и геохимические техники, с тем чтобы минимизировать зависимость результатов мониторинга от погоды и осуществлять оперативные прогнозные оценки при критических усилениях активности вулкана.

Список литературы

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

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

3. Котенко Т.А., Котенко Л.В., Сандимирова Е.И., Шапарь В.Н., Тимофеева И.Ф. **2010.** Извержение вулкана Эбеко в январе-июне 2009 г. (о-в Парамушир, Курильские острова). Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 15 (1): 56–68.

4. Котенко Т.А., Котенко Л.В., Сандимирова Е.И., Шапарь В.Н., Тимофеева И.Ф. **2012.** Эруптивная активность вулкана Эбеко в 2010–2011 гг. (о-в Парамушир). Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 19(1): 160–167.

5. Котенко Т.А., Котенко Л.В., Шапарь В.Н. **2007.** Активизация вулкана Эбеко в 2005–2006 гг. (о-в Парамушир, Курильские острова). *Вулканология и сейсмология*, 5: 1–11.

6. Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В. **2018.** Извержения вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2016–2017 гг. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 37(1): 32–42.

7. Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Будников В.А. **1992.** Активность вулкана Эбеко в 1987–1991 гг.: характер извержений, особенности их продуктов, опасность для г. Северо-Курильск. *Вулканология и сейсмология*, 5–6: 21–33.

8. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В. **2018.** Мониторинг вулканической активности на Курильских островах: 15 лет деятельности группы SVERT. *Геосистемы переходных зон*, 2(3): 259–266. doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.259-266

9. Рычагов С.Н., Белоусов В.И., Главатских С.Ф. **2002.** Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая система: характеристика глубокого геологического разреза и модель современного минералорудообразования в ее недрах. *Вулканология и сейсмология*, 4: 3–21.

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

11. Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Макаров Е.О., Котенко Т.А., Будилов Д.И., Лобачева М.А. **2020а.** Комплексный мониторинг извержения вулкана Эбеко (о. Парамушир, Россия) в конце 2018 г. – начале 2019 г. *Вестник КРАУНЦ*, 1(45): 89–99. doi:10.31431/1816-5524-2019-3-43-89-99

12. Фирстов П.П., Котенко Т.А., Акбашев Р.Р. **2020b.** Усиление эксплозивной активности вулкана Эбеко в апреле–июне 2020 г. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 46(2): 10–15. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-2-46-10-15

13. Чибисова М.В., Дегтерев А.В. **2019.** Активность вулканов на Курильских островах в 2018 г. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 1(41): 91–98. doi:10.31431/1816-5524-2019-1-41-91-98

14. Walter T.R., Belousov A., Belousova M., Kotenko T., Auer A. **2020.** The 2019 eruption dynamics and morphology at Ebeko volcano monitored by Unoccupied Aircraft Systems (UAS) and field stations. *Remote Sensing*, 12(12): 1961. https://doi.org/10.3390/rs12121961

References

1. Gorshkov G.S. **1967.** *Vulkanyzm Kuril'skoy ostrovnoy dugi* [*Volcanism of the Kuril island arc*]. Moscow: Nauka, 287 p. (In Russ.).

2. 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

3. Kotenko T.A., Kotenko L.V., Sandimirova E.I., Shapar' V.N., Timofeeva I.F. **2010.** Eruption of Ebeko volcano from January through June 2009 (Paramushir Island, the Kuriles). *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle* = *Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1 (15): 56–68. (In Russ.).

4. Kotenko T.A., Kotenko L.V., Sandimirova E.I., Shapar' V.N., Timofeeva I.F. **2012.** Eruption activity of Ebeko volcano (Paramushir I.) in 2010–2011. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(19): 160–167. (In Russ.).

5. Kotenko T.A., Kotenko L.V., Shapar' V.N. **2007.** Increased activity on Ebeko volcano, Paramushir I., North Kuriles in 2005–2006. *J. of Volcanology and Seismology*, 1(5): 285–295. https://doi.org/10.1134/ s0742046307050016

6. Kotenko T.A., Sandimirova E.I., Kotenko L.V. **2018.** The 2016–2017 eruptions of Ebeko volcano (Kuriles Islands). *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(37): 32–42. (In Russ.).

7. Menyaylov I.A., Nikitina L.P., Budnikov V.A. **1992.** [The Ebeco volcano activity in 1987–1991: character of eruptions, eruptive products features, hazard for Severo-Kurilsk town]. *Vulkanologiya i seysmologiya* = *Volcanology and Seismology*, 5–6: 21–33. (In Russ.).

8. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V. Monitoring of volcanic activity in the Kurile Islands: 15 years of work SVERT group. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 259–266. (In Russ.). doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.259-266

9. Rychagov S.N., Belousov V.I., Glavatskikh S.F. **2002.** [North Paramushir hydrothermal -magmatic system: the characteristics of deep geological section and model of modern mineral and ore formation in its interior]. *Volcanology and Seismology*, 4: 3–21. (In Russ.).

10. Fedorchenko V.I., Abdurakhmanov A.I., Rodionova R.I. **1989.** [Volcanism of the Kuril island arc: geology and petrogenesis]. Moscow: Nauka, 237 p. (In Russ.).

11. Firstov P.P., Akbashev R.R., Makarov E.O., Kotenko T.A., Budilov D.I., Lobacheva M.A. **2020a.** Geophysical observations of the Ebeko volcano's eruption (Paramushir Island, Russia) over the period September 2018 – April 2019. Vestnik KRAUNTs. *Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(45): 89–99. (In Russ.). doi:10.31431/1816-5524-2019-3-43-89-99

12. Firstov P.P., Kotenko T.A., Akbashev R.R. **2020b.** Growth of explosive activity of Ebeko volcano in April–June 2020. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 2(46): 10–15. (In Russ.). https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-2-46-10-15

13. Chibisova M.V., Degterev A.V. The activity of the Kurile volcanoes in 2018. *Vestnik KRAUNTs. Nauki* o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences, 1(41): 91–98. (In Russ.). doi:10.31431/1816-5524-2019-1-41-91-98

14. Walter T.R., Belousov A., Belousova M., Kotenko T., Auer A. **2020.** The 2019 eruption dynamics and morphology at Ebeko volcano monitored by Unoccupied Aircraft Systems (UAS) and field stations. *Remote Sensing*, 12(12): 1961. https://doi.org/10.3390/rs12121961

Об авторах

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

ЧИБИСОВА Марина Владимировна (ORCID 0000-0003-0677-6945), старший научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, m.chibisova@imgg.ru

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.432.7,556.55,912.644.4+912.648

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.506-513

Самые крупные озера Курильских островов: морфометрия и географическое распределение (материалы к базе данных)

© 2020 Д. Н. Козлов

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: kozlovdn@bk.ru

Резюме. В работе представлены современные сведения о расположении, морфометрии и генезисе крупнейших озерных котловин Курильских островов, полученные в вулканологических экспедициях ИМГиГ ДВО РАН 2005–2018 гг. и при помощи открытых геоинформационных ресурсов. Произведена выборка из 1099 озер по критерию $S \ge 1 \text{ km}^2$, в перечень исследуемых объектов попали 20 малых и средних водоемов, представленные 7 вулканогенными и 13 лагунными озерами. Рассмотренные озера четко разделяются по происхождению, площади и высоте зеркала, максимальной глубине. Наибольшее количество крупных озер приходится на Южные Курилы, а крупнейший Курильский водоем – вулканогенные озера занимают площадь 48.26 км² (60 % от общей площади 20 озер), глубина варьирует в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен метров, средняя – 113 м. Для этой категории озер характерны относительно высокие отметки уровня зеркала – от 50 до 648 м над ур. м. Лагунные озера занимают площадь 32.15 км² (40 % от общей площади 20 озер), глубина водоемов небольшая – от 1 до 23 м, в среднем 8.9 м. Абсолютная высота зеркала озер над ур. м. от 1–5 до 8–9 м. Ключевые слова: Курильские острова, озеро, морфометрия, лагуна, вулкан, кальдера

The largest lakes of the Kuril Islands: morphometry and geographical distribution (materials for the database)

Dmitrii N. Kozlov

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

Abstract. The work presents modern data on the location, morphometry, and genesis of the largest lakes basins of the Kuril Islands obtained in the volcanological expeditions of the IMGG FEB RAS during 2005-2018 and using open geographic information resources. 1099 lakes were sampled according to the criterion $S \ge 1 \text{ km}^2$, the list of studied objects included 20 reservoirs, represented by 7 volcanic and 13 lagoon lakes. The considered lakes are clearly divided according to their origin, area and height of the mirror, and maximum depth. The most part of large lakes falls on the Southern Kurils, and the largest water body – the volcanic lake Koltsevoe – is located on Onekotan Island, which is a part of the group of the Northern Kurils. Volcanic lakes occupy an area of 48.26 km^2 (60 % of the total area of 20 lakes), the depth varies in the range from several tens to several hundred meters. This category of lakes is characterized by relatively high levels of the mirror, which range from 50 to 648 m above sea level. Lagoon lakes occupy an area of 32.15 km^2 (40 % of the total area of 20 lakes), the depth of water bodies is small – from 1 to 23 m, the absolute height of the lake mirror is from 1–5 to 8–9 m.

Keywords: Kuril Islands, lake, morphometry, lagoon, volcano, caldera

Для цитирования: Козлов Д.Н. Самые крупные озера Курильских островов: морфометрия и географическое распределение (материалы к базе данных). Геосистемы переходных зон, 2020, т. 4, № 4, с. 506–513. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.506-513

For citation: Kozlov D.N. The largest lakes of the Kuril Islands: morphometry and geographical distribution (materials for the database). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 506–513. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.506-513

Благодарности и финансирование

Автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания и рекомендации, они учтены в данной работе и будут использованы в дальнейших исследованиях.

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

Acknowledgements and Funding

Author is grateful to the reviewers for useful comments and recommendations, which are taken into account in this work and will be used in further studies.

The work is carried out within the framework of state assignment Federal state budgetary scientific institution IMGG FEB RAS.

Введение

Оценка водных запасов и их рациональное использование – это важная общемировая проблема, которая решается неравномерно для различных регионов и стран. В России актуальность этого вопроса с каждым годом лишь повышается в связи с глобальными изменениями климата, необходимостью исследования и эффективного использования пресной воды и водных биологических ресурсов. Одними из важнейших водных объектов, наряду с водотоками и подземными водами, являются озера. Необходимо иметь полные сводки данных по морфометрии, генезису и пространственному распределению озер разных типов и постоянно корректировать их. За исключением европейской части России, во многих регионах страны эти сведения до сих пор весьма ограниченны или же потеряли свою актуальность. Сахалинская область не является исключением, и если многие озера о. Сахалин относительно хорошо лимнологически изучены, то курильские водоемы в большинстве своем мало исследованы, а имеющиеся сведения нуждаются в обновлении. Первым шагом в этом направлении является изучение самых крупных водоемов, так как они обладают наибольшим водозапасом и потенциалом использования.

В Сахалинской области насчитывается 17 219 озер, из которых 1099 расположено на Курильских островах. Общая площадь курильских озер составляет около 115 км². Детальную классификацию курильских озер (без акцента на морфометрические параметры)

привела в своем физико-географическом очерке Г.В. Корсунская [1958]. Согласно этой работе, на Курилах можно выделить 9 классов озер с 23 разновидностями – озера, связанные: 1) с вулканизмом – кратерные, кальдерные, три разновидности лавоподпрудных и сольфатарные; 2) с аккумулятивной деятельностью моря и рек, лагунные – озера намывных перешейков, песчаных кос, аллювиальных равнин, прибрежных равнин, выровненных берегов, береговых валов и древне-лагунные озера; 3) с деятельностью текучей воды – озера-старицы, старицы береговых валов; 4) с деятельностью ветра – дефляционные; 5) с процессами суффозии – суффозионные; 6) с нивацией – нивально-каровые постоянные и временные; 7) с подпором грунтовых вод – озера плоских водоразделов, временные озера атмосферного питания; 8) с четвертичным оледенением – моренные озера; 9) с деятельностью человека – антропогенные озера.

При всем многообразии крупнейшие озерные котловины Курил представлены преимущественно двумя разновидностями: 1) вулканические озера (они расположены в различного рода вулканических депрессиях, кальдерах, кратерах, отличаются большой глубиной в несколько десятков и даже сотен метров и часто, за счет атмосферных осадков и термальных источников, смешанным питанием); 2) лагунные (реликтовые) озера, частично или полностью отделенные от моря и океана песчаными косами и штормовыми валами. Поэтому при описании крупнейших водоемов Курил мы рассматриваем две названные категории водных объектов.

Важно отметить, что в работе Г.В. Корсунской [1958] описаны преимущественно озера Южных Курил, в то время как самый крупный водоем расположен на севере островной дуги, на о. Онекотан, крупные водоемы есть также и на Средних Курилах. Использованные Г.В. Корсунской сведения получены преимущественно из довоенных работ японских лимнологов и гидробиологов, а это означает необходимость проверки и актуализации исходных данных. В последующем сведения дублировались с небольшими изменениями и по мере изучения частично дополнялись ([Горшков, 1967; Курильские..., 2004]; Справочник..., 2003*). Научные статьи, в основном геологов, гидробиологов и ихтиологов, также в той или иной степени затрагивали морфологию и генезис отдельных озерных систем [Зеленов, Канакина, 1962; Федорченко, 1962; Фазлуллин, Батоян, 1989; Бугаев, Кириченко, 2008]. В связи со сказанным выше возникает необходимость создания обобщенной сводки, а в дальнейшем и актуализируемой электронной базы данных по озерам Курильских островов.

Цель работы, материал и методы

Автором была поставлена цель провести обзор морфометрических параметров, генезиса и географического положения крупнейших водоемов Курильских островов. Для достижения этой цели необходимо выполнить задачи по сбору и актуализации имеющихся сведений на основе литературных данных, сбору информации из открытых геоинформационных ресурсов и обработке результатов исследований Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) за период 2005-2018 гг. Наблюдения ИМГиГ ДВО РАН проводились при помощи цифровой батиметрической съемки со спутниковой привязкой профилей и с использованием надувных моторных лодок, полученные данные были интерпретированы, на их основе составлены батиметрические схемы ([Козлов, 2015, 2016; Козлов и др., 2018]; www.volcaniclakes. com). Съемка велась при помощи цифровых эхолотов Eagle SeaCharter 320 DX и LMS- 527cDF iGPS (фирма Lowrance), оснащенных GPS-приемником, рабочая частота излучателя составляла 50–200 кГц. Детализация эхограмм при такой съемке достигается за счет выбора минимального межгалсового расстояния и шага съемки. Алгоритм составления батиметрических схемы следующий: дан-



Географическое положение крупнейших озер Курильских островов.

Geographical location of the largest lakes of the Kuril Islands.

^{*} Справочник по физической географии Сахалинской области (сост. З.Н. Хоменко). Южно-Сахалинск: Сахалинское кн. изд-во, 2003. 112 с. [Handbook on physical geography of Sakhalin region (ed. Z.N. Homenko). Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin Book Publ. House, 2003. 112 р.]

ные эхолотного профиля в виде файла формата *.slg экспортируются в ПО Lowrance Sonar Viewer, после обработки производится экспорт в файл формата *.csv с последующей фильтрацией данных и построением карт в ПО Surfer.

Расчет основных морфометрических характеристик озер осуществлялся по общепринятым методикам [Верещагин, 1930; Муравейский, 1960; Морфология..., 2004], для сверки координатной привязки и точности полученных параметров использовались данные ГИС SAS Planet и Google Earth Pro.

Из 1099 озер Курильских островов был произведен отбор водоемов, удовлетворяющих критерию S ≥ 1 км². Озер S >100 км², т.е. больших по морфометрической классификации П.В. Иванова [1948], в нашей выборке не оказалось. В исследуемый диапазон попало 20 крупнейших для Курильского региона озер, малых и средних по данной морфометрической классификации (см. рисунок и таблицу). Описание их построено по географическому принципу начиная с юга Курильских островов.

Результаты

Озера южных Курильских островов – самая большая группа в выборке (14 водоемов).

Озеро Горячее, единственное вулканическое озеро о. Кунашир, находится в кальдере Головнина, образовавшейся в результате мощного извержения около 40 тыс. л.н. Генезис озера вулканогенный, его котловина имеет сложное строение и форму полумесяца, с несколькими глубоководными участками в центральной части. Глубина озера 62 м. Максимальная длина 3 км, ширина 1.7 км, площадь 3.1 км², занимает около 30 % площади дна кальдеры. В западной и восточной частях дна озера расположены эксплозивные воронки с мощными газогидротермальными выходами. В 0.6 км южнее от

Таблица.	Крупнейш	ие озера Н	Сурильск	их островов	(S≥1 км²)
Table. La	rgest lakes (of the Kur	il Islands	$(S \ge 1 \text{ km}^2)$	

№ п/п	Остров	Название	Координаты φ° N, λ° Е	Абс. выс. над ур. м., м	Площадь, км ²	Макс. глубина, м	Генезис	Водо- обмен
1	Кунашир	Горячее	43°52′, 145°30′	128	3.1	62.3	В	ПР
2		Весловское	43°43′, 145°33′	1	1.2	1	Л	ПР
3		Песчаное	43°55′, 145°36′	5	7.4	21.5	Л	ПР
4		Лагунное	44°03′, 145°45′	1	3.5	23.4	Л	ПР
5		Круглое	44°22′, 146°24′	8	3.26	5.1	Л	БС
6		Длинное	44°24′, 146°27′	1	2.58	2.8	Л	ПР
7	Итуруп	Красивое	44°37′, 147°12′	82	5.8	50	В	ПР
8		Доброе	44°44′, 147°14′	6	2.6	1.2	Л	ПР
9		Лесозаводское	44°46′, 147°13′	9	1.45	2	Л	БС
10		Куйбышевское	45°03′, 147°39′	5	1.4	11	Л	ПР
11		Благодатное	45°01′, 147°42′	4	4.06	15.7	Л	ПР
12		Лебединое	45°13′, 147°54′	1	1.04	3	Л	ПР
13		Сопочное	45°18′, 148°24′	3	1.33	21.5	Л?	ПР
14		Славное	45°21′, 148°44′	164	2.86	4	В	ПР
15	Симушир	Бирюзовое	46°54′, 151°57′	50	3.2	87	В	БС
16	Кетой	Малахитовое	47°19′, 152°27′	648	1.5	110	В	ПР
17	Онекотан	Кольцевое	49°20′, 154°43′	385	26	369	В	БС
18		Черное	49°34′, 154°50′	72	5.8	110	В	БС
19	Парамушир	Зеркальное	50°03′, 155°25′	1	1.25	6	Л	ПР
20	Шумшу	Большое	50°45′, 156°15′	2	1.08	1.8	Л	ПР

Примечание. В – вулканогенное, Л – лагунное, БС – бессточное, ПР – проточное.

Note. B – volcanic, Π – lagoon, EC – endorheic, Π P – drainage.

него расположено небольшое кратерное озеро Кипящее, представляющее из себя воронку фреатического извержения, озера Кипящее и Горячее соединяет протока антропогенного происхождения. С Охотским морем оз. Горячее соединено ручьем Озерный.

Озеро Весловское (юг Кунашира) формирует очертаниями своей котловины северную часть Весловского полуострова. Это типичное лагунное озеро, имеющее постоянное сообщение с зал. Измены. Озеро, как и остальные водоемы этого типа, мелководное, при этом его центральная и южная части сильно заболочены. Глубина более 1 м. Длина озера 2.7 км, ширина 0.6 км, площадь зеркала 1.2 км².

Озеро Песчаное лагунного типа, имеет сложную форму, вытянуто с северо-запада на юговосток, береговая линия весьма извилистая. Озерная котловина в значительной степени формирует облик Серноводского перешейка и южной части Кунашира в целом. Максимальная отметка достигает 21.5 м. Длина озера 4.35 км, ширина 2.4 км, площадь зеркала 7.4 км².

Озеро Лагунное (центральная часть острова) представляет собой остаточный фрагмент наиболее глубокой части древнего пролива, отмежеванный от моря перемычками из морских и лагунных осадочных толщ. Форма зеркала имеет вид овала, осложненного мысами на севере, западе и востоке. Максимальная глубина 23.4 м. Длина озера 2.6 км, ширина 1.5 км, площадь 3.5 км².

Озеро Круглое (северная часть Кунашира), лагунное, расположено на западе от перешейка Кругловского, между постройкой влк. Тятя и п-овом Ловцова. Как следует из названия, водоем имеет округлую форму, а его берега практически не изрезаны. Максимальная отметка глубины 5.2 м. Длина озера 2.6 км, ширина 1.8 км, площадь зеркала 3.26 км².

Озеро Длинное (северная часть Кунашира), лагунное, расположено на востоке от перешейка Кругловского, имеет сложную вытянутую в меридиональном простирании форму, а его берега достаточно сильно изрезаны. Озеро относительно неглубокое, максимальная отметка 2.8 м. Длина озера 3.7 км, ширина 1.35 км, площадь зеркала 2.58 км².

Озеро Красивое – крупнейший водоем Итурупа. Расположено на юге острова, в 11 км восточнее бухты Львиная Пасть. Частично заполняет живописную кальдеру Урбич – центральную часть сложного вулканического мас-

сива Рокко. Котловина озера имеет простую чашеобразную форму, без осложнения эксплозивными воронками или подводными куполами, выходы газогидротерм отсутствуют. По генезису это озеро вулканическое, а по характеру водообмена сточное: из его юго-восточной части в Тихий океан вытекает единственная река, соединяющая озеро с океаном, – Урумпет. Максимальная глубина озера 50 м. Длина 3 км, ширина 2.45 км, площадь зеркала 5.8 км².

Озеро Доброе (юг Итурупа) лагунного типа, расположено юго-восточнее постройки влк. Атсонопури. Форма зеркала сложная и имеет вид овала, осложненного остатками косы и небольших дельт рек и ручьев, особенно выдается вглубь водоема коса в его северной части, в районе р. Междуозерная. В озеро впадает несколько относительно крупных рек и ручьев, при этом оно имеет сток через р. Тихая в зал. Доброе Начало. Максимальная глубина 1.2 м. Длина озера 2.3 км, ширина 1.43 км, площадь 2.6 км².

Озеро Лесозаводское, как и Доброе, расположено юго-восточнее постройки влк. Атсонопури, однако по характеру водообмена бессточное: в озеро не впадает рек, поверхностный сток из него отсутствует. Форма его зеркала близка к овалу, береговая линия практически не изрезана. Максимальная глубина составляет 2 м. Длина 1.71 км, ширина 1.06 км. Площадь озера, судя по спутниковым снимкам и литературным данным [Корсунская, 1958], за последние 65 лет существенно сократилась, с 1.91 до 1.45 км².

Озеро Куйбышевское находится в центре Итурупа, восточнее одноименного Куйбышевского перешейка. Имеет форму полумесяца, осложненного небольшим заливом в его восточной части. По происхождению это лагунный водоем аллювиальной равнины, имеет сток в Куйбышевский залив. Максимальная глубина 11 м. Длина 2.5 км, ширина 0.43 км, площадь 1.4 км².

Озеро Благодатное (центральная часть Итурупа) примыкает к восточной части Куйбышевского перешейка. Форма котловины сложная, вытянутая с севера на юг, береговая линия сильно изрезана. Озеро имеет несколько притоков (в том числе реки Благодатная и Корсунь), а из него в зал. Касатка вытекает одноименная р. Благодатная. Максимальная глубина 15.7 м. Озеро относительно крупное, его длина 3.15 км, ширина 1.9 км, площадь 4.06 км². *Озеро Лебединое* (северная часть Итурупа) расположено на востоке от г. Курильск, между плато Просторное и р. Курилка. Лагунный водоем аллювиальной равнины. Зеркало вытянуто с запада на восток, в озеро впадает несколько рек и ручьев, имеется сток в р. Курилка. Глубина озера 3 м. Длина 1.89 км, ширина 0.84 км, площадь 1.04 км²

Озеро Сопочное находится в северной части Итурупа. Его зеркало имеет подковообразную форму, а в центре котловины возвышается гора с отметкой 114.6 м над ур. м. Такие очертания делают форму котловины похожей на вулканическую, однако многие считают, что это водоем лагунного происхождения, на сегодняшний день это дискуссионный вопрос. Озеро соединено с морем небольшой протокой длиной более 200 м, впадающей в бухту Торная, в него впадают три небольшие речки длиной от 4 до 7 км. Наибольшая глубина 21.5 м. Длина 2.5 км, ширина 0.8 км, площадь 1.33 км².

Озеро Славное – вулканическое лавоподпрудное озеро, расположенное на п-ове Медвежий (северная оконечность Итурупа), в западной части одноименной кальдеры со сложным строением. Озеро имеет форму, близкую к полумесяцу, вытянуто в меридиональном направлении. Береговая линия западной части практически не изрезана, восточной – напротив, существенно изрезана. Озеро сточное, в море из него вытекает р. Славная, протяженностью 23.5 км. Максимальная глубина 4 м. Длина 2.91 км, ширина 1.5 км, площадь 2.86 км².

Озера средних Курильских островов насчитывают 2 водоема, и оба вулканического генезиса.

Озеро Бирюзовое расположено в кальдере Заварицкого (центральная часть о. Симушир). Его котловина имеет сложную форму, а береговая линия существенно изрезана и частично выполнена лавовыми куполами. Озеро бессточное, в его юго-западной части наблюдаются гидротермальные выходы с температурой до 40 °C при средней температуре вод озера около 14 °C, в этих местах на поверхности видны пузырьки газов и парение. Для озера характерны большие колебания уровня, в настоящее время максимальная глубина составляет 87 м. Длина 2.7 км, ширина 1.8 км, площадь 3.2 км².

Озеро Малахитовое находится в кальдере Кетой, на одноименном острове. Это внутрикальдерный вулканический водоем, форма зеркала напоминает овал, осложненный внутрикальдерным конусом, экструзивным куполом и лавовыми потоками. Сток из озера в Тихий океан осуществляется ручьем Сточный. Максимальная глубина озера 110 м. Длина 1.55 км, ширина 1.32 км, площадь 5 км².

Озера северных Курильских островов представлены 2 вулканическими и 2 лагунными котловинами.

Озеро Кольцевое расположено в кальдере влк. Тао-Русыр в южной части о. Онекотан. Это самый крупный и самый глубокий водоем Курильских островов и Сахалинской области. Озеро бессточное. Имеет форму кольца, так как в северо-западной части кальдеры с ее дна возвышается стратовулкан Пик Креницына (абс. высота 1324 м), в значительной степени формирующий форму зеркала и котловины водоема. Глубина озера 369 м. Ширина в самой узкой части, на северо-западе, 145 м, в самой широкой части, на юго-востоке, – около 3.2 км, общая площадь 35 км², а за вычетом островавулкана Пик Креницына – 26 км².

Озеро Черное (северная часть о. Онекотан) находится в пределах кальдеры Немо, бессточное. Имеет форму полумесяца, схожую с формой оз. Горячее на Кунашире, однако его котловина не осложнена какими-либо эксплозивными формами и не имеет гидротермальных выходов. Береговая линия достаточно сильно изрезана за счет лавовых потоков на западе и за счет эродированных стенок кальдеры на востоке. Глубина озера 110 м. Длина озера 4.5 км, ширина 1.5 км, площадь 5.8 км².

Озеро Зеркальное (о. Парамушир) лагунное, оно формирует очертания п-ова Васильева. Озеро вытянуто с севера на юг и имеет достаточно сложную форму, в него впадает ручей Пыжикова и несколько небольших ручьев, сток в Тихий океан осуществляется через достаточно широкую протоку длиной около 1 км. Максимальная глубина водоема 6 м. Длина 2 км, ширина 0.84 км, площадь 1.25 км².

Озеро Большое (о. Шумшу) – один из самых маленьких водоемов из описанных в данной работе. Оно имеет весьма сложную форму и достаточно изрезанные берега. По водообмену проточное: в него втекает несколько рек и имеется сток в Охотское море. Максимальная глубина озера 1.8 м. Длина 1.7 км, ширина 0.84 км, площадь 1.25 км².
Заключение

Обобщим приведенные сведения о морфометрических параметрах, генезисе и пространственных характеристиках самых крупных озер Курильских островов.

1. На Курилах насчитывается 20 озер с площадью зеркала более 1 км², это всего 1.8 % от общего количества озер региона. Суммарная площадь этих 20 озер составляет 80.4 км² (69.9 % от площади всех Курильских озер).

2. Из 20 рассмотренных озер 7 имеют вулканогенное происхождение, лагунных озер почти в два раза больше, при этом с их морфометрическими параметрами ситуация обратная:

13 лагунных озер занимают площадь 32.15 км² (40 % от суммарной площади 20 озер), глубина водоемов небольшая – от 1 до 23 м, абсолютная высота зеркала над ур. м. также невелика, обычно это первые метры – от 1–5 до 8–9;

7 вулканических озер занимают площадь 48.26 км², что на 20 % больше площади лагунных. Глубина большинства из этих озер также относительно большая и, за исключением оз. Славное, варьирует в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Помимо большой глубины для этой категории озер характерны достаточно высокие отметки уровня зеркала над уровнем моря – от 50 до 648 м. 3. Средняя максимальная глубина для всех рассмотренных котловин составляет 56.1 м, для лагунных озер этот показатель равен 8.9 м, а для вулканических озер – 113 м.

4. По морфометрической площадной классификации оз. Кольцевое относится к средним озерам, остальные озера Курильских островов – к малым.

5. Наибольшее количество (14) рассмотренных озер расположено на южных Курильских островах, 4 – на северных и 2 на средних. Самый крупный из описанных водоемов – вулканогенное озеро Кольцевое – находится на Северных Курилах.

6. Характер водообмена рассмотренных озер не зависит от их географического положения и генезиса. При этом одним из частых признаков вулканогенных озер является присутствие в питании гидротермальных вод.

В задачи дальнейшего исследования автора с коллегами входит создание актуализируемой базы данных открытого доступа об озерах Курильских островов: составление полного перечня объектов, оптимальный набор морфометрических и лимнологических параметров озер, включая данные по объемам водоемов, их средним глубинам, коэффициентам изрезанности береговых линий. Настоящая работа составила часть этой расширенной сводки и планируемой базы данных.

Список литературы

1. Бугаев В.Ф., Кириченко В.Е. **2008.** *Нагульно-нерестовые озера азиатской нерки (включая некоторые другие водоемы ареала)*. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 280 с.

2. Верещагин Г.Ю. **1930.** Методы морфометрической характеристики озер. Л.: Гос. гидрол. ин-т, 115 с. (Труды Олонецкой научной экспедиции. География; ч. 2, вып. 1).

3. Горшков Г.С. 1967. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 287 с.

4. Зеленов К.К., Канакина М.А. **1962.** Бирюзовое озеро (кальдера Заварицкого) и изменение химизма его вод в результате извержения 1957 г. Бюл. вулканол. станции, 32: 33–44.

5. Иванов П.В. **1948.** Классификация озер мира по величине и по их средней глубине. Бюллетень ЛГУ, 20: 29–36.

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

7. Козлов Д.Н. **2016.** Морфология кратерного озера Красивое. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 3(31): 65–71.

8. Козлов Д.Н., Дегтерев А.В., Зарочинцев В.С. **2018.** Кальдерное озеро Кольцевое: современное состояние и строение котловины (о. Онекотан, Северные Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 2(4): 359–364. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.4.359-364

9. Корсунская Г.В. 1958. Курильская островная дуга. М.: Гл. изд-во геогр. литературы, 222 с.

10. Курильские острова. 2004. Авторы: Злобин Т.К., Высоков М.С., Фархутдинов И.П. и др. Южно-Сахалинск: Сахалин. кн. изд-во, 227 с.

11. Морфология рельефа. **2004.** Авторы: Уфимцев Г.Ф., Тимофеев Д.А., Симонов Ю.Г., Спиридонов А.И., Селиверстов Ю.П., Борсук О.А., Ласточкин А.Н., Рождественский А.П., Лоскутов Ю.И., Кошкарев А.В. и др. М.: Научный мир, 184 с.

12. Муравейский С.Д. **1960.** Очерки по теории и методам морфометрии озер. В кн.: *Реки и озера. Гидробиология. Сток.* М.: Географгиз, с. 91–125.

13. Фазлуллин С.М., Батоян В.В. **1989.** Донные осадки кратерного озера вулкана Головнина. *Вулкано- логия и сейсмология*, 2: 44–55.

14. Федорченко В.И. **1962.** Основные этапы послекальдерного периода формирования вулкана Головнина (о. Кунашир). *Труды СахКНИИ*, 12: 127–141.

References

1. Bugaev V.F., Kirichenko V.E. **2008.** Nagul'no-nerestovye ozera aziatskoy nerki (vklyuchaya nekotorye drugie vodoemy areala) [Feeding-spawning lakes of Asian sockeye salmon (including some other water bodies of the area)]. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Kamchatpress, 280 p.

2. Vereshchagin G.Yu. **1930.** *Metody morfometricheskoy kharakteristiki ozer* [*Methods of morphometrical lake characteristic*]. Leningrad: Gos. gidrol. in-t [Leningrad: State Hydrological Institute], 115 p. (Trudy Olonetskoy nauchnoy ekspeditsii [Proceedings of Olonetskaya Scientific Expedition]. Geography; part 2, iss. 1).

3. Gorshkov G.S. **1967.** *Vulkany Kuril'skoy ostrovnoy dugi [Volcanoes of the Kuril island arc]*. Moscow: Nauka, 287 p.

4. Zelenov K.K., Kanakina M.A. **1962.** [Biryuzovoe lake (Zavaritskii caldera) and change in its waters chemistry as a result of the 1957 eruption]. *Bull. vulkanol. stantsii* [*Bulletin of volcanological station*], 32: 33–44.

5. Ivanov P.V. **1948.** Klassifikatsiya ozer mira po velichine i po ikh sredney glubine [Classification of the lakes around the world by size and their average depth]. *Bulleten' LGU*, 20: 29–36.

6. Kozlov D.N. **2015.** [*Crater lakes of the Kuril Islands*]. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin. obl. kraevedch. Muzey [Yuzhno-Sakhalinsk: Regional Museum of Natural History], In-t morskoy geologii i geofiziki DVO RAN [Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS], 112 p.

7. Kozlov D.N. **2016.** [Morphology of Krasivoe crater lake]. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull.* of KRAESC. Earth Sciences, 3(31): 65–71.

8. Kozlov D.N., Degterev A.V., Zarochintsev V.S. Koltsevoe caldera lake: current state and structure of the basin (Onekotan Island, Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 359-364. doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.359-364

9. Korsunskaya G.V. 1958. [The Kuril island arc]. M.: Glavnoye izd-vo geogr. literatury, 222 p.

10. [*Kuril Islands*]. **2004.** Authors: Zlobin T.K., Vysokov M.S., Farkhutdinov I.P. et al. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin. Book Publ., 227 p.

11. *Morfologiya rel'efa* [Relief morphology]. **2004.** Avtory: Ufimtsev G.F., Timofeev D.A., Simonov Yu.G., Spiridonov A.I., Seliverstov Yu.P., Borsuk O.A., Lastochkin A.N., Rozhdestvenskiy A.P., Loskutov Yu.I., Koshkarev A.V. et al. Moscow: Nauchnyy mir, 184 p.

12. Muraveyskiy S.D. **1960.** Ocherki po teorii i metodam morfometrii ozer [Essays on the theory and methods of lakes morphometry]. In: *Reki i ozera. Gidrobiologiya. Stok* [*Rivers and lakes. Hydrobiology. Flow*]. M.: Geografgiz, p. 91–125.

13. Fazlullin S.M., Batoyan V.V. **1989.** [Bottom sediments of the crater lake of the Golovnin volcano]. *Volcanology and Seismology*, 2: 44–55.

14. Fedorchenko V.I. **1962.** [Main stages of the postcaldera period of the Golovnin volcano development (Kunashir Island)]. *Trudy SakhKNII* [*Proceedings of SakhKNII*], 12: 127–141.

Об авторе

КОЗЛОВ Дмитрий Николаевич (ORCID 0000-0002-8640-086Х), кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, kozlovdn@bk.ru

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.46

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.514-525

Термопроявления вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова) и их рекреационно-туристский потенциал

© 2020 Р. В. Жарков

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: rafael zharkov@mail.ru

Резюме. Приводятся результаты исследований физико-химических и бальнеологических свойств термальных вод и гидротермальной (сопочной) грязи влк. Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова). Для оценки рекреационно-туристского потенциала выбраны наиболее представительные объекты. Ультракислый источник № 1 Верхнеюрьевской группы имеет температуру 88 °С, его минерализованные (М – 13 г/л) хлоридно-сульфатные воды содержат в повышенных концентрациях биологически активные элементы (Si, B, Br, Fe²⁺). Гидротермы Верхнеюрьевских термальных источников можно условно отнести к Гайскому типу группы кислых вод и рекомендовать для наружного применения при лечении и профилактике широкого спектра заболеваний. Учитывая сложность маршрута к источникам, рассматривается реальное развитие этой территории не как бальнеотерапевтического комплекса, а как объекта рекреационно-туристской деятельности. Аналогичная ситуация с ультракислым сульфатным термальным источником на Северо-Восточном сольфатарном поле. Кроме гидротерм в нем наблюдаются маломощные отложения гидротермальной грязи, использовать которую в качестве лечебной практически невозможно из-за ее недостаточно хороших физических показателей и относительно малого объема. Наиболее перспективны для рекреации и бальнеотерапии глубинные гидротермы, вскрытые скважиной П-2 в районе г. Северо-Курильск. Температура гидротерм в 2014 г. составляла 82 °C, вода минерализованная (М – 8.6 г/л) хлоридно-гидрокарбонатная натриевая, слабощелочная (pH 7.6), с повышенным содержанием биологически активных компонентов (Si, B, Br). По физико-химическим свойствам гидротермы скважины П-2 можно условно отнести к Лазаревскому гидрохимическому типу лечебных питьевых вод хлоридно-гидрокарбонатной натриевой группы, а в качестве наружного (бальнеологического) применения они условно близки к Кульдурскому типу кремнистых термальных вод различного ионного состава.

Ключевые слова: остров Парамушир, вулкан Эбеко, термальные воды, гидротермальные грязи, бальнеология, рекреация, туризм

Thermal fields of the Ebeko volcano (Paramushir Island, Kuril Islands) and their recreational and tourist potential

Rafael V. Zharkov

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

Abstract. The paper provides with the research results of physicochemical and balneological properties of thermal waters and hydrothermal mud of the Ebeko volcano (Paramushir Island, Kuril Islands). To assess recreational and tourist potential, we sample the most intensive thermal waters outputs. Ultra-acidic spring no. 1 of the Verkhne-Yuryeva group has a temperature of 88 °C, its mineralized (M – 13 g/l) chloride-sulfate waters contain biologically active elements in elevated concentrations (Si, B, Br, Fe²⁺). Thermal waters of the Verkhne-Yuryeva springs can be roughly attributed to the Gaisky type of the acid water group and recommended for external use in the treatment and prevention of a wide range of diseases. Given the

complexity of the route to the springs, the real development of this territory is considered not as a balneotherapy complex, but as an object of recreational and tourist activities. A similar situation is with an ultra-acidic sulfate thermal spring in the North-Eastern solfataric field. In addition to hydrotherms, it contains thin deposits of hydrothermal mud , which is almost impossible to use as a therapeutic due to its insufficiently good physical indicators and relatively small volume. The most promising deep hydrotherms for recreation and balneotherapy are opened by a well P-2 in the area of Severo-Kurilsk. In 2014, the hydrotherms temperature was 82 °C, mineralized water (M – 8.6 g/l) chloride-hydrocarbonate sodium, slightly alkaline (pH 7.6), with an elevated content of biologically active components (Si, B, Br). According to the physical and chemical properties, the thermal waters of well P-2 can be tentatively attributed to the Lazarevsky hydrochemical type of therapeutic drinking water of chloride-hydrocarbonate sodium group, and as an external (balneological) use, they are tentatively close to the Kuldur type of siliceous thermal waters of various ion composition.

Keywords: Paramushir Island, Ebeko volcano, thermal waters, hydrothermal mud, balneology, recreation, tourism

Для цитирования: Жарков Р.В. Термопроявления вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова) и их рекреационно-туристский потенциал. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 4, с. 514–525. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.514-525

For citation: Zharkov R.V. Thermal fields of the Ebeko volcano (Paramushir Island, Kuril Islands) and their recreational and tourist potential. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 514–525. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.514-525

Благодарности и финансировнаие

Автор выражает глубокую благодарность Л.В. Котенко, Т.А. Котенко, М.Л. Котенко, Г.Л. Панину, М.В. Мазуренко, Е.Г. Калачевой за неоценимую помощь при проведении полевых исследований на о. Парамушир в 2014 г.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН и государственного контракта с Министерством здравоохранения Сахалинской области.

Acknowledgements and Funding

Author is grateful to L.V. Kotenko, T.A. Kotenko, M.L. Kotenko, G.L. Panin, M.V. Mazurenko, E.G. Kalacheva for invaluable help in field works carrying out on Paramushir Island in 2014.

The work is carried out within the framework of state assignment IMGG FEB RAS and state contract with the Ministry of health of the Sakhalin Region.

Введение

Вулкан Эбеко (1156 м), расположенный на севере о. Парамушир, является одним из самых активных вулканов на Курильских островах. История формирования вулкана и его активность в XX-XXI вв. достаточно хорошо изучены [Горшков, 1967; Меняйлов и др., 1992; Мелекесцев и др., 1993 a, b; Котенко и др., 2007, 2018; Рыбин и др., 2016, 2018; Дегтерев, Чибисова, 2020; Фирстов и др., 2020; и др.]. В пределах сложной постройки вулкана выделяются 3 вершинных кратера, внутри и на внешних склонах которых расположено несколько сольфатарных полей с выходами сольфатарных газов со средней температурой 100-110 °С и разных по физико-химическим характеристикам термальных вод. Изучение особенностей сольфатарной и гидротермальной деятельности влк. Эбеко началось в 1950-х гг. и продолжается до настоящего времени [Иванов, 1957; Нехорошев, 1960; Зеленов и др., 1965; Мархинин, Стратула, 1977; Меняйлов и др., 1988, 1992; Белоусов и др., 2002; Чудаев, 2003; Рычагов и др., 2004; Котенко, Котенко, 2006; Сhudaev et al., 2006; Бортникова и др., 2006; Панин и др., 2010; Газогидротермы..., 2013; Калачева, Котенко, 2013; Kalacheva et al., 2016; Тагап et al., 2018; Kalacheva, Taran, 2018; Калачева, Таран, 2019].

Автором в августе 2014 г. в рамках реализации государственного контракта Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск) с Министерством здравоохранения Сахалинской области проводились исследования на влк. Эбеко. Цель исследований заключалась в выявлении физико-химических особенностей термопроявлений района с упо-

ром на оценку перспектив их использования в бальнеологии и рекреационно-туристской деятельности. Для выполнения поставленной цели необходимо было выполнить тепловизионную съемку объектов изучения; провести отбор проб термальных вод и гидротермальных грязей для последующих лабораторных физико-химических и микробиологических исследований; дать оценку перспектив использования исследуемых объектов. Исследования микробиологических показателей гидротерм и оценка их рекреационного потенциала ранее не проводились.

Для оценки перспективных рекреационных ресурсов влк. Эбеко было выбрано несколько известных и относительно доступных объектов: Верхнеюрьевские термальные источники, термальные источники Северо-Восточного сольфатарного поля и действующая на тот момент скважина П-2 с гидротермами в 1.5 км от г. Северо-Курильск (рис. 1). В ходе полевых работ была проведена тепловизионная съемка объектов изучения, отобраны пробы термальных вод и гидротермальных грязей для последующих лабораторных исследований и оценки перспектив их использования. Материалы по физико-химическим показателям и основным бальнеологическим рекомендациям частично были опубликованы в справочном издании Владивостокского филиала Дальневосточного научного центра физиологии и патологии дыхания – Научно-исследовательского института медицинской климатологии и восстановительного лечения (ДНЦ ФПД – НИИМКВЛ), специалисты которого выполняли исследования по заказу ИМГиГ ДВО РАН [Челнокова, Гвозденко, 2017]. В представленной нами работе более детально рассмотрены физико-химические показатели исследуемых гидротермальных проявлений и даны конкретные рекомендации по возможности их использования в качестве рекреационно-туристских объектов.

Методы исследований

В ходе полевых исследований на влк. Эбеко автором с помощью GPS-приемника определены координаты основных источников и сольфатар. Полевые замеры температуры выполняли электронным термометром Digital-K8803 с точностью измерения 0.1 °С. Инфракрасную (тепловизионную) съемку участков с выходами гидротерм проводили с помощью тепловизора SAT SDS Hotfind-LXS. Полученные термограммы позволяют выявить характер распределения температур на поверхности исследуемого участка местности.

Был произведен отбор проб термальных вод и глинистых отложений источников и по заказу ИМГиГ ДВО РАН проведены лабораторные исследования. Полный химический анализ гидротерм, краткий физико-химический анализ грязи и количественный химический анализ



грязевого отжима выполнены в 2014 г. аккредитованной лабораторией ОАО «Приморгеология» (г. Владивосток) по стандартным методикам. Микробиологические исследования выполнены в испытательной лаборатории филиала Федерального бюджетного учреждения здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Сахалинской области» (г. Северо-Курильск). На основе полученных результатов по заказу ИМГиГ ДВО РАН Владивостокским филиалом ДНЦ ФПД – НИИМКВЛ разработаны бальнеологические заключения и даны рекомендации по практическому использованию исследуемых гидротерм

Рис. 1. Схема расположения объектов исследований на влк. Эбеко (Google Earth, космический снимок от 26.10.2012 г.). 1 – Верхнеюрьевский термальный источник; 2 – термальный источник Северо-Восточного сольфатарного поля; 3 – скважина П-2.

Figure 1. Scheme of study objects location on the Ebeko volcano (Google Earth, space image from 26.10.2012). 1 – Verkhne-Yuryeva thermal spring; 2 – thermal spring of the North-Eastern solfataric field; 3 – well P-2.

и грязей [Челнокова, Гвозденко, 2017]. Рекомендации даны исходя из ГОСТ Р 54316–2011¹ и методических указаний², которые отменены в 2007 г., но за неимением действующего документа неформально используются.

Результаты и обсуждение Верхнеюрьевские термальные источники

Верхнеюрьевские термальные источники расположены северо-западнее Северного кратера влк. Эбеко в верховьях р. Юрьева и приурочены к разрушенной постройке влк. Влодавца. Абсолютная отметка выходов вод – около 500 м над ур. м. Общая протяженность участка около 700 м. Детальные схемы расположения термальных источников представлены в работах [Мархинин, Стратула, 1977; Калачева, Котенко, 2013; Kalacheva et al., 2016]. Первые выходы вод отмечаются в двух распадках, являющихся истоками р. Юрьева. Правый распадок берет начало у вершины с отметкой 1019 м. Левый распадок – глубокий овраг на очень крутом склоне горы Зеленая. Выходы парогазовых струй (рис. 2) приурочены к останцу лав между двумя холодными ручьями, питающимися за счет таяния снежников горы Зеленая. Ниже, у слияния этих ручьев, находится самый высокотемпературный источник всей группы источник № 1 по [Мархинин, Стратула, 1977].



Рис. 2. Верхнеюрьевская группа термальных источников в районе источника № 1.

Figure 2. Verkhne-Yuryeva group of the thermal springs in the vicinity of spring no. 1.

Ниже по течению ручья из трещин в его бортах наблюдается множество незначительных выходов гидротерм, парение которых особенно заметно в прохладную безветренную погоду (рис. 2).

Исследованный нами в 2014 г. источник № 1 с дебитом ~1 л/с и температурой 88 °C расположен в приустьевой части холодного ручья. Вода с редкими пузырьками спонтанного газа изливается из трещин (рис. 3) в гидротермально измененных породах с налетами ярко-желтой серы. Термальная вода источника № 1 минерализованная (М – 13 г/л), хлоридносульфатная со сложным катионным составом (табл. 1), кремнистая, борная, с высоким содержанием железа и алюминия (табл. 2), с ультракислой реакцией среды (рН 1.1). За период исследований этого источника с 1950-х годов существенных изменений физико-химических показателей не отмечается, за исключением более высокой минерализации гидротерм (17-20 г/л) в те годы. По результатам анализов 1955–1962 гг. [Мархинин, Стратула, 1977] соотношения основных ионов в гидротермах сопоставимы как с нашими результатами, так и с данными коллег [Kalacheva et al., 2016], проводивших в 2014 г. полевые исследования на влк. Эбеко.



Рис. 3. Тепловизионный снимок термального источника № 1 Верхнеюрьевской группы. Справа (темный цвет) видна устьевая часть холодного ручья.

Figure 3. Thermal image of the thermal spring no. 1 of the Verkhne-Yuryeva group. On the right (dark color), there is the mouth of a cold stream.

¹ГОСТ Р 54316–2011. Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2011, 48 с. GOST Р 54316–2011. [Drinking natural mineral waters. General specifications]. Moscow: Standartinform, 2011, 48 р.

² Классификация минеральных вод и лечебных грязей для целей их сертификации: Метод. указания № 2000/34. Москва: Мин-во здравоохранения Российской Федерации, Рос. научный центр восстановительной медицины и курортологии, 2000. [Classification of mineral waters and therapeutic mud for the purpose of their certification: Methodical guidelines no. 2000/34]. Moscow: Ministry of Health of the Russian Federation, Russian Scientific Centre of Medical Rehabilitation and Balneology, 2000.

Микробиологическими исследованиями в лаборатории филиала Центра гигиены и эпилемиологии в Сахалинской области (г. Северо-Курильск) определено, что бактериологические показатели гидротерм Верхнеюрьевского источника влк. Эбеко соответствуют требованиям и нормам МУК 4.2.1884-04: общие колиформные бактерии (в 100 мл) менее 500 КОЕ (при величине допустимого уровня не более 500 КОЕ); термотолерантные колиформные бактерии (в 100 мл) менее 100 КОЕ (допустимый уровень не более 100 КОЕ); возбудители кишечных инфекций не обнаружены (не допускаются).

Верхнеюрьевские термальные источники относительно доступны, посещаются немногочисленными группами местных жителей, туристов и ученых. Пеший маршрут к источникам от г. Северо-Курильск имеет протяженность около 10 км, перепад высот до 1000 м, в зависимости от физической подготовки может занимать несколько часов. Часть маршрута можно проехать на квадроциклах. Воды Верхнеюрьевских термальных источников, в связи с ультракислой реакцией среды, можно рекомендовать только для наружного бальнеологического применения. Согласно названной выше Классификации минеральных вод, данные термы в бальнеологическом отношении можно условно отнести к Гайскому типу группы кислых вод с высоким содержанием металлов [Челнокова, Гвозденко, 2017]. По аналогии с Гайским типом воды возможно наружное применение в виде ванн и купаний при лечении и профилактике функциональных болезней нервной системы, болезней костномышечной, мочеполовой системы, заболеваний кожи. Учитывая небольшой поток посетителей Верхнеюрьевской группы термальных источников и сложность маршрута к ним, ожидать в обозримом будущем реальное развитие этой территории как бальнеотерапевтического комплекса не приходится. Долину р. Юрьева можно рассматривать как объект развития рекреационно-туристской деятельности.

Таблица 1. Химически	ий состав термальных	вод вулкана Эбеко	
Table 1. Chemical com	position of the thermal v	waters of the Ebeko	volcano

Компонент	мг/л (% экв.)			Шифр метолики	
Romioneni	1	2	3	шифр методики	
Na ⁺	306.0 (24)	26.8 (13)	2760.0 (95)	ГОСТ 23268.6-78	
\mathbf{K}^+	127.0 (6)	27.9 (8)	91.0 (2)	ГОСТ 23268.7-78	
Ca^{2+}	377.0 (34)	46.1 (25)	40.5 (2)	ГОСТ 23268.5-78	
Mg^{2+}	166.0 (25)	6.3 (5)	19.0 (1)	»	
$\mathrm{NH_4^+}$	15.2 (2)	12.1 (7)	<0.50 (-)	ГОСТ 23268.10-78	
Fe ²⁺	<0.05 (-)	<0.05 (-)	<0.05 (-)	ГОСТ 23268.11-78	
Fe ³⁺	92.0 (9)	71.0 (42)	<0.05 (-)	»	
∑ катионов	1083.2 (100)	190.20 (100)	2910.50 (100)	-	
Cl-	2998.0 (32)	339.0 (5)	2815.0 (63)	ГОСТ 23268.17-78	
SO ₄ ^{2–}	8797.0 (68)	8991.0 (95)	70.0 (2)	ГОСТ 23268.4-78	
NO ₃ ⁻	<0.2 (-)	75.0 (-)	31.0 (-)	ГОСТ 23268.9-78	
NO ₂ -	<0.2 (-)	<0.20 (-)	<0.20 (-)	ГОСТ 23268.8-78	
CO ₃ ^{2–}	<6.0 (-)	<6.0 (-)	<6.0 (-)	ГОСТ 23268.2-78	
HCO ₃ ⁻	<5.0 (-)	<5.0 (-)	2696.0 (35)	ГОСТ 23268.3-78	
∑ анионов	11 795.0 (100)	9405.0 (-)	5612.0 (100)	-	
М	13 034.4	9712.2	8564.5	-	
T, ℃	88.0	90.0	82.0	-	
pH	1.14	1.06	7.65	ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97	

Примечания. %-экв – процент-эквивалент иона в общей сумме катионов или анионов. Здесь и в табл. 2: 1 – Верхнеюрьевский термальный источник № 1; 2 – термальный источник Северо-Восточного сольфатарного поля; 3 – гидротермы скважины П-2. Прочерк – нет данных. Анализы выполнены в 2014 г. в Центральной лаборатории ОАО «Приморгеология» (г. Владивосток), начальник лаборатории Т.Б. Горбенко.

Note. Here and in the table 2: 1 - the Verkhne-Yuryeva thermal spring no.1; 2 - thermal spring of the North-Eastern solfataric field; 3 - hydrotherms of well P-2. Dash – no data available. The analysis were performed in 2014 in the Central laboratory of the OAO "Primorgeologiya" (Vladivostok), chief of the laboratory T.B. Gorbenko.

Для рекреации (отдыха, восстановления) русла ручьев в местах выходов гидротерм подпруживают, смешивая холодную и термальную воду в пропорциях, комфортных для купаний в неглубоких естественных ваннах. Здесь важно грамотно провести подпруживание, чтобы не нанести ущерб окружающим ландшафтам с термальными источниками. С таким подходом рекреацию можно совместить с экологическим познавательным туризмом и активно развивать рекреационно-туристскую деятельность. При возможном увеличении потока посетителей необходимо провести комплексные эколого-географические исследования для оценки воздействия рекреационной нагрузки на территорию и дать рекомендации по ее

1/	Соде	ржание (Погрешность)		Illude veronury	
Компонент	1	2	3	шифр методики	
Al	540.0 (±73.0)	Не опр.	0.53 (±0.07)	ГОСТ 31870-12	
Ba	0.144 (±0.024)	Не опр.	0.93 (±0.12)	»	
Be	<0.0001 (-)	Не опр.	<0.0001 (-)	ГОСТ 18294-89	
В	10.8 (±0.9)	10.7 (±0.9)	30.6 (±2.6)	ГОСТ 51210-98	
Br	8.50 (±0.36)	12.2 (±0.5)	113 (±5)	ГОСТ 23268.15-78	
V	0.80 (±0.10)	Не опр.	<0.01 (-)	ГОСТ 31870-12	
Bi	<0.01 (-)	Не опр.	<0.01 (-)	»	
W	<0.01 (-)	Не опр.	<0.01 (-)	»	
Si	156.0 (±20.0)	117.0 (±15.0)	42.0 (±5.0)	»	
Fe(II)	163.0 (±14.0)	Не опр.	0.180 (±0.036)	ГОСТ 23268.11-78	
Fe(III)	<0.05 (-)	Не опр.	<0.05 (-)	»	
Ι	<0.10 (-)	<0.10 (-)	<0.10 (-)	ГОСТ 23268.16-78	
Cd	0.083 (±0.017)	0.032 (-)	<0.0001 (-)	ГОСТ 31870-12	
Co	<0.05 (-)	4.11 (-)	<0.05 (-)	»	
Li	0.229 (±0.035)	Не опр.	1.28 (±0.19)	»	
Mn	4.7 (±0.7)	6.68 (-)	0.042 (±0.011)	»	
Cu	<0.005 (-)	36.38 (-)	<0.005 (-)	»	
Mo	<0.001 (-)	Не опр.	0.39 (±0.06)	»	
As	<0.002 (-)	Не опр.	<0.002 (-)	ГОСТ 23268.14-78	
Ni	0.59 (±0.07)	Не опр.	1.1 (±0.14)	ГОСТ 31870-12	
Hg	$0.00236 (\pm 0.00034)$	0.0072 (-)	0.0029 (±0.0004)	ПНД Ф 14.1:2:20-95	
Pb	1.77 (±0.30)	2.91 (-)	<0.001 (-)	ГОСТ 31870-12	
Se	<0.0001 (-)	Не опр.	<0.0001 (-)	ГОСТ 19413-89	
Ag	<0.005 (-)	Не опр.	<0.005 (-)	ГОСТ 31870-12	
Sr	5.9 (±0.7)	Не опр.	5.0 (±0.6)	ГОСТ 23950-88	
Sb	<0.005 (-)	Не опр.	0.24 (±0.04)	ГОСТ 31870-12	
U	0.056 (±0.009)	Не опр.	<0.002 (-)	ПНД Ф 14.1:2:4.38-95	
PO_4	<0.25 (-)	Не опр.	<0.25 (-)	ГОСТ 18309-72	
F	9.2 (±0.6)	Не опр.	9.2 (±0.6)	ГОСТ23868.18-78	
Cr	1.49 (±0.19)	Не опр.	<0.001 (-)	ГОСТ 31870-12	
Zn	1.04 (±0.16)	11.07 (-)	< 0.005 (-)	»	

Таблица 2. Содержание микрокомпонентов в гидротермах вулкана Эбеко, мг/л *Table 2.* Content of microelements in the hydrotherms of the Ebeco volcano, mg/l

Примечание. Не опр. – микроэлемент не определялся. Note. Не опр. – microelement were not identified. устойчивому развитию, как это было сделано, например, на Камчатке [Голубева, Завадская, 2012; Завадская, Голубева, 2013; Завадская, Яблоков, 2014]. Кроме антропогенного фактора необходимо учитывать и природные катастрофические процессы, такие как извержения влк. Эбеко, мощные циклоны, приводящие к русловой эрозии, селям и оползням в долине р. Юрьева.

Термальные источники Северо-Восточного сольфатарного поля

В пределах Северо-Восточного сольфатарного поля отмечено множество сольфатар с температурой до 100 °С и несколько термальных источников. В 1950-х гг. здесь отмечалась активизация сольфатарной деятельности, ультракислые (рН 0.03–0.09) термальные источники имели высокую минерализацию (43.4–50.9 г/л), преимущественно хлоридный анионный состав, среди катионов преобладал водород [Мархинин, Стратула, 1977]. Детальные схемы Северо-Восточного сольфатарного поля, характеристики термальных источников и сольфатар представлены в работах [Мархинин, Стратула, 1977; Kalacheva et al., 2016].

Один из самых крупных источников был опробован нами в 2014 г. Источник представляет собой «кипящий» котел размером 1 × 1 м, врезанный в подножие склона и окруженный сольфатарными выходами (рис. 4).

Из котла выбрасываются струйки воды на высоту 20–40 см и небольшим ручейком вытекают гидротермы с температурой более 90 °С (рис. 5). В русле ручейка на участке примерно 1.5×2 м отлагаются глинистые осадки серого цвета. Мощность глинистых отложений 5-20 см. Отжим из этих отложений относится к ультракислым (рН 1.06) сульфатным водам со сложным катионным составом (табл. 1), относительно высоким содержанием кремния (117 мг/л), общая минерализация составляет 9.7 г/л. Микроэлементный состав определялся (табл. 2) для нескольких элементов, среди которых были биологически активные микроэлементы (Br – 12.2, B – 10.7, I – менее 0.1 мг/л) (табл. 2). Химический состав отжима существенно отличается от состава опробованных в 1959 г. Е.К. Мархининым источников [Мархинин, Стратула, 1977], но хорошо согласуется с физико-химическими данными коллег, проводивших исследования в августе 2014 г. [Kalacheva et al., 2016].

Для определения возможности бальнеологического использования глинистых отложений был проведен комплекс физико-химических исследований. Внешние признаки данной гидротермальной (сопочной) грязи: однородная грязевая масса светло-серого цвета, имеет слабый исчезающий запах сероводорода. Физико-химические показатели грязи соответствуют некоторым основным нормам для лечебных гидротермальных грязей. Влажность изменяется от 43.74 до 51.28 % (при норме для сопочной грязи 40-80 % по Классификации минеральных вод 2000 г.), объемный вес – 1.55 г/дм³. Засоренность минеральными включениями диаметром >0.25 мм невысокая – 0.13 % (на сырую грязь) [Челнокова, Гвозденко, 2017].

Относительно низкая липкость исследуемой грязи (при 25 °C составляет всего



Рис. 4. Термальный источник Северо-Восточного сольфатарного поля.

Figure 4. Thermal spring of the North-Eastern solfataric field.



Рис. 5. Тепловизионный снимок исследуемого источника Северо-Восточного сольфатарного поля.

Figure 5. Thermal image of the investigated spring of the North-Eastern solfataric field.

1109 дин/см²), величина сопротивления сдвигу (962 дин/см²), не соответствующая норме (1500-2500 дин/см² для грязей, подготовленных к процедурам), и невысокая теплоемкость $(0.61 \text{ кал/г} \cdot \text{град при норме } 0.8-0.9 \text{ кал/г} \cdot \text{град})$ в исследуемых грязях уменьшают возможность использовать их для аппликаций на кожные покровы. Поэтому практическое применение термальных вод и грязей данного источника в бальнеотерапевтической деятельности представляется невозможным. Сами термальные воды источника, которые небольшим ручейком стекают в долину р. Кузьминка, можно было бы использовать по аналогии с Верхнеюрьевскими термами, но из-за их небольшого дебита это нецелесообразно. Применение гидротермальной грязи в качестве лечебной также маловероятно из-за недостаточно хороших физических показателей и относительно малого объема в источнике. В связи с этим Северо-Восточное сольфатарное поле, самое доступное из всех сольфатарных полей влк. Эбеко, перспективно в качестве объекта экологического и научного туризма. Стоит отметить, что в последнее время район Северо-Восточного сольфатарного поля подвергается воздействию эруптивной активности влк. Эбеко, новая фаза которой началась в октябре 2016 г. и продолжается до сих пор [Фирстов и др., 2020]. В результате мощных эксплозий термальные источники и сольфатары поля могут серьезно пострадать, вплоть до погребения пирокластическими отложениями.

Гидротермы скважины П-2

В 1.5 км к западу от г. Северо-Курильск расположена скважина П-2 (рис. 6), пробуренная в начале 1990-х годов при поиске геотермального месторождения. Из трех пробуренных с учетом геофизических данных глубоких скважин (П-1, П-2 и ГП-3) только скважина П-2 вскрыла низкотемпературные термальные воды (80 °C на устье). По данным изучения скважины П-2 известно, что ее расход уменьшается в связи с зарастанием ствола карбонатными отложениями (от 5 л/с после окончания бурения и до 0.8 л/с через 4 года). Последнее свидетельствует о присутствии в глубинных гидротермах значительных содержаний углекислого газа, который в восходящем потоке переходит в свободную газовую фазу [Рычагов и др., 2004].

По нашим данным, в 2014 г. температура гидротерм на устье скважины составляла 82 °С, дебит около 1 л/с, вода минерализованная (М – 8.6 г/л) хлоридно-гидрокарбонатная натриевая (табл. 1), слабощелочная (рН 7.6). В воде присутствуют в повышенных концентрациях следующие микрокомпоненты, в том числе биологически активные (мг/л): Si – 42.0; В – 30.6; Br – 113; Li – 1.28; Ni – 1.1; Hg – 0.0029; Sr – 5.0; F – 9.2 (табл. 2). Полученные результаты сопоставимы с данными коллег, проводивших опробования гидротерм скважины П-2 в августе 2014 г. [Kalacheva et al., 2016].

Несмотря на антисанитарные условия вокруг скважины П-2, бактериологические показатели в августе 2014 г. соответствовали требованиям и нормам МУК 4.2.1018-01: общее микробное число (КОЕ в 1 мл) менее 50 КОЕ (допустимый уровень не более 50 КОЕ); общие колиформные бактерии (в 100 мл) не обнаружены (норма – отсутствие); термотолерантные колиформные бактерии (в 100 мл) не обнаружены (отсутствие); возбудители кишечных инфекций (в 100 мл) не обнаружены (отсутствие).

Согласно ГОСТ Р 54316–2011, термальные воды скважины П-2 можно условно отнести [Челнокова, Гвозденко, 2017] к Лазаревскому гидрохимическому типу лечебных вод XXVa хлоридно-гидрокарбонатной натриевой группы, имеющей широкий спектр показаний для внутреннего применения. Данные гидротермы можно использовать по назначению врача при болезнях пищевода, хроническом гастрите, болезнях печени, желчного пузыря и желчевыводящих путей, поджелудочной железы, при нарушениях органов пищеварения после оперативных вмешательств, болезнях обмена



Рис. 6. Состояние гидротермальной скважины П-2 в 2014 г.

Figure 6. Condition of the hydrothermal well P-2 in 2014.

веществ. Для наружного бальнеологического применения гидротерм скважины П-2 аналогом условно можно считать Кульдурский тип кремнистых термальных вод различного ионного состава³. Воды этого типа рекомендуется использовать в виде ванн при болезнях системы кровообращения, болезнях нервной, костно-мышечной, эндокринной, мочеполовой систем, болезнях кожи, расстройстве питания и нарушении обмена веществ (ожирение алиментарное). Для уточнения клинических рекомендаций применения гидротерм в лечебно-профилактических целях необходимы дальнейшие комплексные экспериментально-клинические испытания под руководством специалистов аккредитованных организаций.

После мощного циклона в сентябре 2017 г., приведшего к паводкам в долине р. Матросская, устьевую часть скважины и грунтовую дорогу от нее до г. Северо-Курильск занесло мощными аллювиальными отложениями. В случае расчистки дороги и восстановления скважины ее гидротермы могут быть использованы для рекреации и бальнеотерапии. Можно предложить несколько вариантов рационального развития этой территории. Например, в районе скважины обустроить небольшой комплекс с термальными ваннами и/или бассейном для рекреации местных жителей и туристов. Более затратный и сложный вариант – с помощью трубопровода подвести гидротермы от скважины до города с размещением бальнеологического комплекса непосредственно в Северо-Курильске. Здесь возникнут сложности с прокладкой трубопровода в долине р. Матросская и его возможным повреждением паводками, зарастанием трубы карбонатными отложениями, малым дебитом и остыванием гидротерм при прохождении по трубопроводу и т.д. По данным [Рычагов и др., 2004], в междуречье рек Матросская и Снежная может быть широко распространен горизонт напорных хлоридных вод с температурами не менее 150-200 °С на глубинах от 300-400 до 800-1000 м. При заинтересованности государственных структур или частных инвесторов в развитии рекреационно-туристской деятельности на о. Парамушир может быть реализован вариант бурения в этом районе дополнительной скважины с хорошим дебитом и высокой температурой гидротерм.

Заключение

В результате проведенных комплексных исследований основных гидротермальных проявлений влк. Эбеко впервые были рассмотрены перспективы их бальнеологического и рекреационного использования. Теоретически, кислые термоминеральные воды и гидротермальные грязи привершинной части влк. Эбеко имеют бальнеологический потенциал, но на практике в обозримом будущем его применение нецелесообразно. Сольфатарные поля и группы термальных источников можно рассматривать как объекты развития рекреационно-туристской деятельности, но с обязательным условием минимального антропогенного воздействия на ландшафты. Перспективны в бальнеотерапевтическом отношении глубинные термальные воды на периферии влк. Эбеко, вскрытые скважиной П-2 в 1.5 км от г. Северо-Курильск. По физико-химическим свойствам гидротермы скважины условно относятся к Лазаревскому гидрохимическому типу лечебных питьевых вод хлоридно-гидрокарбонатной натриевой группы, а в качестве наружного (бальнеологического) применения их можно использовать по аналогии с Кульдурским типом кремнистых термальных вод различного ионного состава. Эти гидротермы предварительно можно рекомендовать для внутреннего и наружного применения при лечении и профилактике широкого спектра заболеваний, но для уточнения клинических рекомендаций обязательны комплексные экспериментально-клинические испытания под руководством специалистов аккредитованных организаций. После проведения медицинских экспериментально-клинических исследований можно будет детализовать схему и показания к наружному или внутреннему приему гидротерм. Развитие данной территории может пойти по нескольким вариантам, в зависимости от желания и возможностей частных инвесторов и/или государственных структур. Наиболее рациональным в настоящее время представляется вариант восстановления существующей скважины П-2 и оборудование небольшого рекреационного комплекса с термальными ваннами и/или бассейном для отдыха местных жителей и туристов.

³Классификация минеральных вод..., 2000. [Classification of mineral waters..., 2000]

Список литературы

1. Белоусов В.И., Рычагов С.Н., Сугробов В.М. **2002.** Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая конвективная система: геологическое строение, концептуальная модель, геотермальные ресурсы. *Вулканология и сейсмология*, 1: 34–50.

2. Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Трофимова Л.Б. Котенко Т.А., Николаева И.В. **2006.** Гидрогеохимия газогидротермальных источников вулкана Эбеко (о-в Парамушир). *Вулканология и сейсмология*, 1: 39–51.

3. Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис. 2013. Авторы: Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Гора М.П., Шевко А.Я., Панин Г.Л., Жарков Р.В., Ельцов И.Н., Котенко Т.А., Бортникова С.П., Манштейн Ю.А. и др. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 282 с.

4. Голубева Е.И., Завадская А.В. **2012.** Потенциал устойчивого развития рекреационного природопользования на особо охраняемых природных территориях Камчатского края. *Вестник Национальной академии туризма*, 4(24): 43–47.

5. Горшков Г.С. 1967. Вулканы Курильской островной дуги. М.: Наука, 287 с.

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

7. Завадская А.В., Голубева Е.И. **2013.** Природные комплексы гидротермальных систем Камчатки как объекты рекреации и туризма. *География и природные ресурсы*, 4: 46–51.

8. Завадская А.В., Яблоков В.М. **2014.** Эколого-географические основы рекреационного использования термальных экосистем (на примере долины р. Гейзерной). В кн.: Труды *Кроноцкого государственно- го природного биосферного заповедника*, Воронеж: СТП, 190–208.

9. Зеленов К.К., Ткаченко Р.П., Канакина М.Л. **1965.** Перераспределение рудообразующих элементов в процессе гидротермальной деятельности вулкана Эбеко (о. Парамушир). *Труды ГИНАН СССР*, 141: 140–167.

10. Иванов В.В. **1957.** Современная гидротермальная деятельность вулкана Эбеко на острове Парамушир. *Геохимия*, 1: 63–77.

11. Калачева Е.Г., Котенко Т.А. **2013.** Химический состав вод и условия формирования Верхне-Юрьевских термальных источников (о. Парамушир, Курильские острова). *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 22(2): 55–68.

12. Калачева Е.Г., Таран Ю.А. **2019.** Процессы, контролирующие изотопный состав (δD и δ¹⁸O) термальных вод Курильской островной дуги. *Вулканология и сейсмология*, 4: 3–17. doi:10.31857/S0203-0306201943-17

13. Котенко Т.А., Котенко Л.В. 2006. Гидротермальные проявления и тепловой поток вулканов Эбеко и Крашенинникова (о. Парамушир, Курильские о-ва). Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 7(1): 129–137.

14. Котенко Т.А., Котенко Л.В., Шапарь В.Н. **2007.** Активизация вулкана Эбеко в 2005–2006 гг. (о-в Парамушир, Курильские острова). *Вулканология и сейсмология*, 5: 1–11.

15. Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В. **2018.** Извержения вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2016–2017 гг. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 37(1): 32–42.

16. Мархинин Е.К., Стратула Д.С. 1977. Гидротермы Курильских островов. М.: Наука, 212 с.

17. Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирьянов В.Ю., Курбатов А.В., Несмачный И.А. **1993а.** Вулкан Эбеко (Курильские о-ва): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Ч. 1. *Вулканология и сейсмология*, 3: 69–81.

18. Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирьянов В.Ю., Курбатов А.В., Несмачный И.А. **1993b.** Вулкан Эбеко (Курильские о-ва): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Ч. 2. *Вулканология и сейсмология*, 4: 24–41.

19. Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. **1988.** Особенности химического и изотопного состава фумарольных газов в межэруптивный период деятельности вулкана Эбеко. *Вулканология и сейсмология*, 4: 21–36.

20. Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Будников В.А. **1992.** Активность вулкана Эбеко в 1987–1991 гг.: характер извержений, особенности их продуктов, опасность для г. Северо-Курильск. *Вулканология и сейс-мология*, 5–6: 21–33.

21. Нехорошев А.С. **1960.** Геотермические условия и тепловой поток вулкана Эбеко на острове Парамушир. *Бюл. вулканологических станций*, 29: 38–46.

22. Панин Г.Л., Котенко Т.А., Котенко Л.В., Карин Ю.Г. **2010.** Геофизико-геохимические исследования термальных полей вулкана Эбеко. *Литосфера*, 3: 171–176.

23. Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Чибисова М.В., Гурьянов В.Б., Коротеев И.Г. **2016.** Вулканическая активность на Курильских островах в 2012–2015 гг. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 30(2): 77–87.

24. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В. **2018.** Активность вулканов Курильских островов в 2017 г. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 38(2): 102–109.

25. Рычагов С.Н., Пушкарев В.Г., Белоусов В.И., Кузьмин Д.Ю., Мушинский А.В., Сандимирова Е.И., Бойкова И.А., Шульга О.В., Николаева А.Г., Егорова Н.П. **2004.** Северо-Курильское геотермальное месторождение: геологическое строение и перспективы использования. *Вулканология и сейсмология*, 2: 56–72.

26. Фирстов П.П., Котенко Т.А., Акбашев Р.Р. **2020.** Усиление эксплозивной активности вулкана Эбеко в апреле–июне 2020 г. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 46(2): 10–15. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-2-46-10-15

27. Челнокова Б.И., Гвозденко Т.А. 2017. Минеральные воды и лечебные грязи Дальнего Востока. Владивосток: ДВФУ, 220 с.

28. Чудаев О.В. **2003.** Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 216 с.

29. Chudaev O., Chudaeva V., Sugimory K., Kuno A., Matsuo M., Nordstrom K. **2006.** Geochemistry of hydrothermal system of Kuril Islands. In: *Proceedings of 5th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kuril-Kamchatka-Aleutian Arcs.* Hokkaido University, 1–5.

30. Kalacheva E., Taran Yu. **2018.** Role of hydrothermal flux in the volatile budget of a subduction zone: Kuril arc, northwest Pacific. *Geology*. https://doi.org/10.1130/G45559.1

31. Kalacheva E., Taran Yu., Kotenko T., Hattori K., Kotenko L., Solis-Pichardo G. **2016.** Volcanohydrothermal system of Ebeko volcano, Paramushir, Kuril Islands: Geochemistry and solute fluxes of magmatic chlorine and sulfur. *J. of Volcanology and Geothermal Research*: 118–131.

32. Taran Y., Zelenski M., Chaplygin I., Malik N., Campion R., Inguaggiato S., Pokrovsky B., Kalacheva E., Melnikov D., Kazahaya R., Fischer T. **2018.** Gas emissions from volcanoes of the Kuril Island arc (NW Pacific): Geochemistry and fluxes. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, vol. 19: 1859–1880. https://doi.org/10.1029/2018GC007477

References

1. Belousov V.I., Rychagov S.N., Sugrobov V.M. **2002.** [Northern Paramushir hydrothermal and magmatic convective system: geological structure, conceptual model, geothermal resources]. *Volcanology and Seismology*, 1: 34–50. (In Russ.).

2. Bortnikova S.B., Bessonova E.P., Trofimova L.B. Kotenko T.A., Nikolaeva I.V. **2006.** Hydrogeochemistry of thermal springs on Ebeko volcano, Paramushir Isl. *J. of Volcanology and Seismology*, 1: 39–51. (In Russ.).

3. Gazogidrotermy aktivnykh vulkanov Kamchatki i Kuril'skikh ostrovov: sostav, stroenie, genesis [Gashydrotherms of active volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands: composition, structure, genesis]. **2013.** Authors: Bortnikova S.B., Bessonova E.P., Gora M.P., Shevko A.Ya., Panin G.L., Zharkov R.V., El'tsov I.N., Kotenko T.A., Bortnikova S.P., Manshteyn Yu.A. et al. Novosibirsk: INGG SO RAN, 282 p. (In Russ.).

4. Golubeva E.I., Zavadskaya A.V. **2012.** Prospects of sustainable ecotourism development in protected areas of the Kamchatka Region. *Vestnik Natsional'noy akademii turizma [Vestnik of the National tourism academy*], 4(24): 43–47. (In Russ.).

5. Gorshkov G.S. **1967.** *Vulkany Kuril'skoy ostrovnoy dugi [Volcanoes of the Kuril island arc]*. Moscow: Nauka, 287 p.

6. 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

7. Zavadskaya A.V., Golubeva E.I. **2013.** Natural complexes of hydrothermal systems of Kamchatka as objects for recreation and tourism. *Geography and Natural Resources*, 34(4): 339–344.

8. Zavadskaya A.V., Yablokov V.M. **2014.** [Ecological and geographical basis for recreational usage of thermal ecosystems (on the example of the valley of the Geyzernaya river)]. In.: *Trudy Kronotskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika* [*Proceedings of the Kronotsky state nature biosphere reserve*], Voronezh: STP, 190–208. (In Russ.).

9. Zelenov K.K., Tkachenko R.P., Kanakina M.L. **1965.** [Redistribution of the ore-forming elements during hydrothermal activity of the Ebeco volcano (Paramushir Island)]. *Trudy GIN AN SSSR* [*Proceedings of Geological Institute of the USSR Academy of Sciences*], 141: 140–167. (In Russ.).

10. Ivanov V.V. **1957.** [Modern hydrothermal activity of the Ebeco volcano on Paramushir Island]. *Geokhimiya* [*Geochemistry*], 1: 63–77. (In Russ.).

11. Kalacheva E.G., Kotenko T.A. **2013**. Water geochemistry and formation conditions of the Verkhne-Yuryeva thermal springs, Paramushir Island. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 22(2): 55–68. (In Russ.).

12. Kalacheva E.G., Taran Yu.A. **2019.** Processes controling isotopic composition (δD and $\delta^{18}O$) of thermal waters of the Kuril Island Arc. *J. of Volcanology and Seismology*, 13(4): 201–215. https://doi.org/10.1134/s0742046319040031

13. Kotenko T.A., Kotenko L.V. **2006.** The hydrothermal manifestations and heat flow by Ebeko and Krasheninnikov volcanoes (Paramushir Isl., Kuril Islands). *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(7): 129–137. (In Russ.).

14. Kotenko T.A., Kotenko L.V., Shapar' V.N. 2007. Increased activity on Ebeko volcano, Paramushir I., North Kuriles in 2005–2006. J. of Volcanology and Seismology, 1(5): 285–295. https://doi.org/10.1134/s0742046307050016

15. Kotenko T.A., Sandimirova E.I., Kotenko L.V. 2018. The 2016–2017 eruptions of Ebeko volcano (Kuriles Islands). Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences, 1(37): 32–42. (In Russ.).

16. Markhinin E.K., Stratula D.S. 1977. Gidrotermy Kuril'skikh ostrovov [Hvdrotherms of the Kuril Islands]. Moscow: Nauka, 212 p.

17. Melekestsev I.V., Dvigalo V.N., Kir'yanov V.Yu., Kurbatov A.V., Nesmachnyy I.A. 1993a. [The Ebeco volcano (the Kuril Islands): history of eruptive activity and future volcanic hazard. Part 1]. Volcanology and Seismology, 3: 69-81. (In Russ.).

18. Melekestsev I.V., Dvigalo V.N., Kir'yanov V.Yu., Kurbatov A.V., Nesmachnyv I.A. 1993b. [The Ebeco volcano (the Kuril Islands): history of eruptive activity and future volcanic hazard. Part 2]. Volcanology and Seismology, 4: 24-41. (In Russ.).

19. Menyaylov I.A., Nikitina L.P., Shapar' V.N. 1988. [Features of chemical and isotopic composition of fumarole gases during the repose period of the Ebeco volcano activity]. Volcanology and Seismology, 4: 21-36. (In Russ.).

20. Menyaylov I.A., Nikitina L.P., Budnikov V.A. 1992. [The Ebeco volcano activity during 1987–1991: eruptions character, features of their products, hazard for the town of Severo-Kurilsk]. Volcanology and Seismology, 5-6: 21-33. (In Russ.).

21. Nekhoroshev A.S. 1960. [Geothermal conditions and heat flow of the Ebeco volcano on Paramushir Island]. Byul. vulkanologicheskikh stantsii [Bulletin of volcanological station], 29: 38-46. (In Russ.).

22. Panin G.L., Kotenko T.A., Kotenko L.V., Karin U.G. 2010. Geophysical and geochemical investigations of thermal fields of Ebeco volcano (Paramushir Island). Litosfera = Lithosphere (Russia), 3: 171–176. (In Russ.).

23. Rybin A.V., Degterev A.V., Chibisova M.V., Gur'yanov V.B., Koroteev I.G. 2016a. Volcanic activity in the Kurile Islands in 2012–2015. Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences, 2(30): 77-87. (In Russ.).

24. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V. 2018. The 2017 activity of the Kurile Islands volcanoes. Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences, 2(38): 102–109. (In Russ.). doi:10.31431/1816-5524-2018-2-38-102-109

25. Rychagov S.N., Pushkarev V.G., Belousov V.I., Kuz'min D.Yu., Mushinskiv A.V., Sandimirova E.I., Boykova I.A., Shul'ga O.V., Nikolaeva A.G., Egorova N.P. 2004. North Kuril geothermal field: geological structure and development potential. J. of Volcanology and Seismology, 2: 56-72. (In Russ.).

26. Firstov P.P., Kotenko T.A., Akbashev R.R. 2020. Growth of explosive activity of Ebeko volcano in April-June 2020. Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences, 2(46): 10-15. (In Russ.). https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-2-46-10-15

27. Chelnokova B.I., Gvozdenko T.A. 2017. Mineral'nye vody i lechebnye gryazi Dal'nego Vostoka [Mineral waters and therapeutic mud of the Far East]. Vladivostok: DVFU, 220 p. (In Russ.).

28. Chudaev O.V. 2003. Sostav i usloviya obrazovaniya sovremennykh gidrotermal'nykh sistem Dal'nego Vostoka Rossii [Composition and formation conditions of the modern hydrothermal systems of the Russian Far *East*]. Vladivostok: Dal'nauka, 216 p. (In Russ.).

29. Chudaev O., Chudaeva V., Sugimory K., Kuno A., Matsuo M., Nordstrom K. 2006. Geochemistry of hydrothermal system of Kuril Islands. In: Proceedings of 5th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kuril-Kamchatka-Aleutian Arcs. Hokkaido University, 1-5. (In Russ.).

30. Kalacheva E., Taran Yu. 2018. Role of hydrothermal flux in the volatile budget of a subduction zone: Kuril arc, northwest Pacific. Geology. https://doi.org/10.1130/G45559.1

31. Kalacheva E., Taran Yu., Kotenko T., Hattori K., Kotenko L., Solis-Pichardo G. 2016. Volcanohydrothermal system of Ebeko volcano, Paramushir, Kuril Islands: Geochemistry and solute fluxes of magmatic chlorine and sulfur. J. of Volcanology and Geothermal Research: 118–131.

https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.11.006

32. Taran Y., Zelenski M., Chaplygin I., Malik N., Campion R., Inguaggiato S., Pokrovsky B., Kalacheva E., Melnikov D., Kazahaya R., Fischer T. 2018. Gas emissions from volcanoes of the Kuril Island arc (NW Pacific): Geochemistry and fluxes. In: Geochemistry Geophysics Geosystems, vol. 19: 1859-1880. https://doi .org/10.1029 /2018GC007477

Об авторе

ЖАРКОВ Рафаэль Владимирович (ORCID 0000-0002-9753-0627; ResearcherID: J-6233-2018; ScopusID: 55296771900), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, rafael zharkov@mail.ru

Правила оформления и публикации рукописей в журнале «Геосистемы переходных зон»

E-mail: gtrz-journal@mail.ru

Список научных специальностей

и соответствующих им отраслей науки, по которым журнал «Геосистемы переходных зон» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук

Шифр	Наименование группы научных специальностей, наименование научной специальности	Наименование отраслей науки, по которым присуждается ученая степень
25.00.00	Науки о Земле	
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	Географические
25.00.28	Океанология	Географические Геолого-минералогические Физико-математические
25.00.35	Геоинформатика	Геолого-минералогические Физико-математические
25.00.36	Геоэкология	Геолого-минералогические Географические
01.02.00	Механика	
01.02.04	Механика деформируемого твердого тела	Физико-математические Технические

График выхода журнала: № 1 – март; № 2 – июнь; № 3 – сентябрь; № 4 – декабрь.

Журнал публикует оригинальные и обзорные научные статьи, краткие научные сообщения Short Report, письма с дискуссией по статьям, рецензии на научные издания, а также сообщения о конференциях, семинарах, экспедициях, об изданной научной литературе.

Научным статьям и сообщениям присваивается идентификатор CrossRef – DOI (Digital Object Identification).

Журнал «Геосистемы переходных зон» имеет DOI: https://doi.org/10.30730/gtrz .

Рукописи принимаются в электронной форме в течение года по e-mail: gtrz-journal@mail.ru

Заказные и ценные письма и бандероли редакция не получает.

В журнале принято *двустороннее слепое рецензирование* (подробнее о порядке рецензирования см. на сайте журнала). В качестве рецензентов выступают известные специалисты по данному направлению, имеющие публикации по тематике статьи и необходимый уровень цитирования.

Выбор рецензента – прерогатива редколлегии, но авторы могут указать в сопроводительном письме 4–6 потенциальных рецензентов своей работы (минимум из 2 разных регионов или разных стран; эксперты в данной области; отсутствие сотрудничества, в том числе соавторства за последние 3 года; не члены редколлегии журнала). Авторы также имеют право указать имена тех специалистов, кому, по их мнению, не следует отправлять работу в связи с возможным конфликтом интересов. Данная информация является строго конфиденциальной и принимается во внимание при организации рецензирования, кроме случаев, когда у редактора есть более веские основания, чем у автора.

Если статья не отвечает тематике журнала, не содержит предмета научного исследования, не соответствует этическим требованиям, дублирует опубликованные материалы, логически не выстроена, изложена неудобоваримым языком и т.п., редакция может аргументированно отказать автору в публикации на основании первичного скрининга, до проведения рецензирования. Решение о публикации принимает редакционная коллегия в течение 3–4 месяцев со дня получения материалов на основании минимум 2 рецензий. Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Статью с копиями рецензий и редакционными замечаниями высылают автору. Возвращение рукописи на доработку еще не означает принятия ее к публикации. Вся дальнейшая работа над статьей идет в редакционном файле, в котором автор дорабатывает текст и присылает его вместе с ответным письмом. Ответное письмо следует писать в файле с рецензией или редакционным заключением. В нем нужно:

- ответить на каждый комментарий рецензентов;
- указать конкретно, какие именно изменения внесены в статью;
- написать убедительное, вежливое возражение, если, по мнению автора, рецензент неправ.
- поблагодарить рецензента за полезные замечания и конструктивную критику.

Редколлегия на основании рецензий и ответной реакции автора определяет дальнейшую судьбу рукописи.

Принятую к печати статью снова читает редактор и согласовывает с автором правки, связанные с содержанием. Готовый к верстке файл следует внимательно вычитать, поскольку в верстке допустима только мелкая правка.

Работу включают в план номера. Содержание номера утверждает ответственный за номер и/или главный редактор, за которым остается право отклонить статью по серьезным на то основаниям (конфликт интересов, недостаточный уровень новизны исследования и т.п.). В случае принятия статьи к публикации автору сообщают, в каком номере она будет опубликована.

Авторы статей несут ответственность за содержание статей и факт их публикации, о чем подписывают авторское заявление.

Редакция вправе изъять уже опубликованную статью, если выяснится, что в процессе ее публикации были нарушены чьи-либо права или общепринятые нормы научной этики. О факте изъятия статьи редакция сообщает ее автору, специалистам, давшим рекомендацию или рецензию, организации, где работа выполнялась, и в базу научного цитирования, в которой журнал индексируется.

Публикация статей бесплатна для авторов. По запросу авторов редакция после выхода журнала в свет высылает pdf-файл с опубликованной статьей. Печатные экземпляры издания можно приобрести в редакции или оформив подписку в Агентстве «Роспечать» (индекс 80882). Подписавшиеся на журнал, сделав своевременно по электронной почте запрос в редакцию, получат бесплатно pdf-файл с электронной версией журнала в течение недели после подписания его в печать.

Структура основного файла (см. файл Образец оформления статьи на сайте журнала)

Тематическая рубрика из приведенного выше списка специальностей.

Индекс УДК по таблицам Универсальной десятичной классификации, имеющимся в библиотеках, или с помощью интернет-ресурса http://teacode.com/online/udc/

Заглавие. 10–12 слов. Короткое, емкое. По возможности избегайте общих слов, научных жаргонизмов и аббревиатур. В идеале все слова названия могут служить ключевыми при научном поиске.

Инициалы и фамилии авторов (отметить звездочкой автора для контактов и указать e-mail для переписки).

Полные названия учреждений (как они значатся в Уставе), к которым аффилированы авторы, и их местонахождение (город, страна).

Реферат (*резюме, аннотация*) – **Abstract**. Объем 200–300 слов. Без прочтения всей статьи дает четкое представление о цели статьи, ее научной новизне и достигнутых результатах. Поэтому в нем в лаконичной форме должны быть четко обозначены проблема, обоснование цели, материалы и методы, результаты исследования и их интерпретация, выводы.

Для иностранных ученых абстракт зачастую является единственным источником информации о содержании русскоязычной статьи и изложенных в ней результатах исследования.

Избегайте пассивных глагольных форм (*The study tested, но не It was tested in this study. Мы доказали звучит лучше, чем Нами доказано*). Классическое безличное *было продемонстрировано, описано* как бы переводит на второй план личную ответственность.

Ключевые слова (не более 10, допустимы словосочетания из двух слов) в оптимальном варианте отражают: предмет исследования, методы, объект, специфику данной работы. Используются для индексирования и поиска. Призваны облегчить нахождение статьи в базах данных.

Благодарности и сведения о финансовой поддержке работы (с номерами грантов в скобках).

Текст статьи с вставленными в текст иллюстрациями и таблицами в программе Word любой версии без использования макросов. Если в статье есть формулы, символы и т.п., продублируйте файл в pdf.

Список цитируемых источников.

Сведения о всех авторах (в конце статьи): фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность,

лаборатория, кафедра или отдел с полным и сокращенным названием (аббревиатурой) учреждения (как в Уставе), ORCID (Open Researcher and Contributor ID), а также (если есть) ResearcherID (ID WoS) и Scopus ID каждого автора, почтовый адрес, e-mail; телефон контактного автора.

Отдельными файлами прилагаются:

1) Авторское заявление (форму скачать на сайте журнала);

2) скан-копия Экспертного заключения (по форме, принятой в организации автора) о возможности опубликования в открытой печати;

3) графические материалы;

4) в случае необходимости разрешения на публикацию отдельных материалов (см. файл О разрешениях на использование материалов третьих лиц на сайте журнала).

На английском языке в файле со статьей дублируются:

- заглавие,
- имена и фамилии авторов,
- наименования организаций (как они значатся в Уставе),
- реферат и ключевые слова,
- подрисуночные подписи,
- заголовки таблиц,
- сведения о финансовой поддержке работы и благодарности,
- полные сведения о всех авторах.

Транслитерация элементов (при необходимости) производится в системе BGN – с помощью сайта <u>http://translit.ru/</u>

Для лучшего восприятия и цитирования статьи желательно придерживаться четкой структуры, учитывая рекомендации АНРИ (Ассоциации научных редакторов и издателей), а также рекомендации EASE (European Association of Science Editors) для авторов и переводчиков научных статей, которые должны быть опубликованы на английском языке.

Введение

Осветите следующие вопросы:

- Современные взгляды на проблему.
- Что было сделано ранее (обзор литературы; укажите оригинальные и важные работы, в том числе последние обзорные статьи). Избегайте ссылок на устаревшие результаты. Выделите нерешенные вопросы в пределах общей проблемы.
- Какова ваша гипотеза, каковы ваши цели (постановка задачи с упором на новизну, четко сформулируйте цель статьи).
- Что было проделано вами.

Материал (объект) и методы исследования

- Опишите, как вы изучали поставленную проблему.
- Не описывайте процедуры и методы, данные о которых публиковались ранее.
- Укажите применяемое оборудование и опишите использованные материалы.

Результаты исследования или Эксперимент (исследование, моделирование и т.п.)

- Систематизированный авторский аналитический и статистический материал (ключевое слово здесь систематизированный).
- Таблицы, графики и текст не должны дублировать друг друга.
- Рисунки и таблицы это история исследования. Они должны быть понятными и без текста, таблицы не перегруженными, всё подписано и на своем месте. Не забудьте привести подрисуночные подписи и заголовки таблиц помимо русского на английском языке.

Обсуждение результатов – очень важный раздел.

- Желательно сравнить результаты с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Самый очевидный способ поднять цитирование – это не только представить свои данные, но и сопоставить их с мировыми или региональными аналогами. Модель и выводы должны быть универсальны с точки зрения восприятия учеными не только вашей специальности. Если модель хорошая, если выводы сделаны и обоснованы правильно, то они должны быть понятны любому.
- Не стоит игнорировать работы, чьи результаты противоречат вашим вступите с ними в конструктивную дискуссию и убедите читателя в своей правоте.
- Чтобы предвосхитить возможные замечания рецензентов, обсудите ограничения ваших результатов что не удалось сделать и почему.

При необходимости введите тематические подзаголовки, объедините некоторые разделы (Введение и методы, Результаты и обсуждение, Обсуждение и заключение, и т.п.).

Выводы и Заключение – это не одно и то же, но их, как правило, объединяют под заголовком Заключение. Выводы лаконично излагают главные результаты, желательно фразами, отличающимися от высказанных

в основной части статьи.

Важно: выводы должны четко коррелировать с формулировкой цели и задач работы, с результатами и содержанием аннотации.

Заключение

• Дает ответ на вопросы, что нового статья добавляет к уже опубликованным результатам и насколько работа позволяет продвинуться вперед в данной области знаний.

• Предлагает обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивает их практическую значимость, определяет направления для дальнейшего исследования в этой области и, желательно, прогноз развития рассмотренных вопросов.

Список литературы

Обязательны работы последних 5–10 лет. Не забывайте о работах иностранных коллег. В обзорных статьях наряду с современными, новейшими источниками укажите те, в которых исследуемая тематика была затронута или разработана впервые. Минимизируйте ссылки на учебные пособия, справочники, энциклопедии и т.п., которые не могут быть серьезной основой для научного исследования. Цитирование собственных работ не должно превышать 20 % от общего числа в списке.

Данные

В этом разделе автор может разместить дополнительную информацию – данные экспериментов, вспомогательных методов исследования и тому подобные данные, поддерживающие выводы в статье. По существу, это приложение к статье. Такая информация также может быть размещена в качестве дополнительного материала к статье в электронной версии журнала.

Обширная база данных вкупе с методами их обработки, имеющая самостоятельную научную ценность, может быть опубликована в виде отдельной работы со ссылкой на собственно научную статью, в которой обсуждаются результаты анализа этих данных.

Если результаты эксперимента еще не осмыслены на уровне обобщения, достойном статьи, но представляются важными для решения научной проблемы, оформите их в виде **краткого сообщения** (постановка задачи, экспериментальный материал, выводы, небольшой список литературы).

Что обычно смотрят рецензенты?

- Аннотацию-реферат прежде всего.
- Рисунки. Рецензенты с большим стажем выявили корреляцию: если рисунки проблемные, то статья скорее всего тоже вызовет вопросы.
- Затем рецензенты проверят:
- насколько точно название отражает содержание статьи;
- четко ли коррелируют выводы с формулировкой цели и задач работы, изложением результатов и содержанием реферата;
- достаточно ли выводы аргументированы представленным материалом;
- качество списка литературы: представительный список литературы демонстрирует профессиональный кругозор авторов и научный уровень исследования.

Основные требования к оформлению статьи

Формат листа	A4
Поля	по 1,5 см со всех сторон
Шрифты	Times New Roman – для текста, Symbol – для греческих букв
Размер шрифта	12–13
Десятичный символ	точка, а не запятая
Межстрочный интервал	1,15–1,5
Выравнивание текста	по левому краю
Автоматическая расстановка переносов	нет

Все текстовые элементы (в том числе в библиографических списках), кроме случаев, подчиняющихся общепринятым орфографическим правилам, набираются строчными (не прописными!) буквами. Используются «кавычки», но не "кавычки". Даты в тексте в форме «число.месяц.год» набиваются следующим образом: 02.05.1991.

Точка не ставится после: УДК, заглавия статьи, авторов, адресов, заголовков и подзаголовков, названий таблиц, размерностей (с – секунда, г – грамм, мин – минута, ч – час, сут – сутки (но мес. – месяц, г. – год), млн – миллион, млрд и т.п.), в подстрочных индексах (Т_{пл} – температура плавления).

Пробелом отделяются инициалы от фамилии (*А.А. Иванов*); размерность от цифры: 100 кПа, 77 К, 50 %, 10 ‰, кроме градусов: 90° (но 20 °C); порядковые номера от любого обозначения: рис. 1, fig. 1, табл. 2; знак широты и долготы в географических координатах: 56.5° N; 85.0° Е.

Между двумя цифрами ставится не дефис, а тире (одновременным нажатием Ctrl и тире на правой цифровой панели) без пробелов с обеих сторон, например: 1984–1991 гг.; 6–8 м.

Математические формулы, оформляемые отдельной строкой и содержащие знаки, отсутствующие в Times New Roman, должны набираться **целиком в редакторе, совместимом с** Microsoft Office.

Формулы и символы, которые можно внести в текст, не используя специальный редактор, набираются латиницей и/или через опцию Вставка – Символ. Нежелательно использовать символы в рефератах на русском и английском языках – в интернет-сети символы не отображаются.

Таблицы должны быть озаглавлены, в них не должно быть пустых ячеек. Прочерки обязательно поясняются в примечании. При создании таблиц используйте возможности Word (Вставка – Таблица – Добавить таблицу).

Иллюстративные материалы размещаются по тексту статьи (через опцию Вставка – Рисунок – Обтекание – В тексте; рисунки к тексту не привязывайте и не размещайте их вместе с подписями в форме таблиц!). Если Word не дает иной возможности показать желаемое для вас расположение рисунков и их частей, сделайте макет и представьте его в PDF.

Для верстки статьи рисунки представляются в виде отдельных файлов в той версии, в которой они создавались.

Форматы: для фото, рисунков – jpg (300–600 dpi); для графиков, диаграмм, схем и т.п. – tiff, xls (Excel), cdr (CorelDraw) версий 12.0(2004) или X4(2008).

Размеры рисунков, шрифтов надписей на них должны быть выбраны с учетом уменьшения их в соответствии с размерами полосы (17 × 23 см) и колонки (8 × 23 см).

Надписи на осях начинаются с прописной буквы: Глубина, м. В подрисуночных подписях сначала идет общий заголовок к рисунку, а затем расшифровка частей и легенды. Литеры для обозначения частей рисунка ставятся латиницей в скобках: (a), (b) и т.д. На рисунках в десятичных дробях ставьте точки, а не запятые.

Поскольку редакция планирует постепенно перейти к выпуску параллельных версий на русском и английском языках, к русскоязычным статьям крайне желательно помимо подписей представлять в двух вариантах и рисунки: 1) с надписями и символами на русском языке и 2) с надписями и символами на английском языке. Тем более что социальная сеть ученых ResearchGate зачастую предлагает автору русскоязычной статьи добавить отдельно рисунки с надписями на английском языке и комментариями или сопутствующую информацию для ознакомления англоязычного сообщества.

Объем каждого графического файла – не более 10 Мб. Цветные рисунки принимаются в том случае, когда их нельзя без ущерба для смысла перевести в черно-белые.

В тексте должны быть ссылки на все рисунки.

Величины и единицы измерения должны соответствовать стандартным обозначениям согласно Международной системе единиц СИ.

Список литературы (см. на сайте Оформление ссылок в списке литературы) помещается после основного текста статьи, он составляется в алфавитном порядке.

В пределах работ одного автора вначале идут работы одного автора, потом этого автора с одним соавтором, затем этого автора с двумя и более соавторами – в каждой группе в хронологическом по возрастанию порядке. Авторы числом до 10 приводятся все.

Курсивом выделяется при описании моноизданий название работы, а в аналитическом описании – название источника.

Списки литературы с учетом требований международных систем цитирования должны быть приспособлены для автоматической обработки с целью идентификации ссылок. Русскоязычные (на кириллице) ссылки машины не считывают, поэтому журнал помещает библиографические списки не только на языке оригинала, но и в латинице.

Редакция просит авторов не переводить самостоятельно на английский язык названия статей, монографий, сборников статей, конференций и т.п. Автор должен только привести наряду с русскими описания английских версий (если они опубликованы) или библиографические сведения на английском языке, имеющиеся в оригинале (Ф.И.О. авторов на латинице, англоязычное название работы, название источника (журнала) в транслитерации и параллельное англоязычное, если оно есть в оригинале или на сайте), с указанием после выходных данных языка публикации (In Russ.).

Чтобы не терять ссылки в базах, автор при подаче рукописи в редакцию должен настаивать на идентичной, однажды избранной им форме транслитерации своей фамилии. Однако фамилии и инициалы авторов на латинице следует приводить так, как они даны в оригинальной публикации.

Правила библиографического описания одинаковы для русскоязычных и англоязычных источников. В журнале принят стиль библиографических описаний, близкий к стилю Chicago (с элементами стиля APA – American Psychological Association). Обязательные элементы: авторы (редакторы), год издания, полное наименование книги или статьи, место издания, издательство, название источника в полной форме, том, номер, количественная характеристика (для книги – общее число страниц, для статьи или главы – страницы, на которых она помещена, например: 5–10), идентификатор doi (если имеется) или унифицированный идентификатор ресурса URI (URL) и дата обращения.

На основе списка литературы, приведенного в рукописи, редакция составляет References. Неточность в библиографических описаниях приводит к потере ссылок в базах цитирования и поэтому недопустима. Подробнее об оформлении библиографических описаний в списке см. файл *Оформление ссылок в списке литературы* на сайте журнала.

В списке литературы

1) должны быть приведены DOI в формате <u>https://doi.org/</u> или полные интернет-адреса (URL) для ссылок там, где это возможно; описания английских версий (если они опубликованы) или библиографические сведения на английском языке, имеющиеся в оригинале (Ф.И.О. авторов на латинице, англоязычное название статьи и источника);

2) все источники должны легко обнаруживаться средствами поисковых систем (Google, Yandex и др.).

В тексте должны быть ссылки на все приведенные в списке источники.

Ссылки на литературу в тексте даются в квадратных скобках с указанием фамилии автора (или первого автора при трех и более соавторах), фамилий двух соавторов и года выпуска, например: [Петров, 2011; Olami et al., 1992; Левин, Носов, 2009]. В одинаковых ссылках на разные работы одного года и в их описаниях в списке при обозначении года ставятся латиницей литеры: [Сим и др., 2016 a, b].

В список литературы не включаются:

- учебники;
- статьи из ненаучных журналов;
- нормативные и законодательные акты;
- статистические сборники и архивы;
- электронные неопубликованные ресурсы (онлайн-статьи, газетные и любые новостные ресурсы, доклады и разные исследования на сайтах, сайты учреждений и организаций);
- диссертации;
- словари, энциклопедии, другие справочники;
- отчеты, записки, рапорты, протоколы.

Указанные источники оформляются в виде внутритекстовых ссылок в круглых скобках или в виде постраничных сносок внизу страницы.

Примеры библиографических описаний в списке литературы

Монографическое издание

- 1. Грачев А.Ф. (ред.) **1998**. Новейшая тектоника Северной Евразии: Объясн. записка к карте новейшей тектоники Сев. Евразии м-ба 1:5 000 000. М.: ГЕОС, 147 с.
- 2. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А. **2014**. *Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин*. М.: Научный мир, 172 с
- IPCC: Climate Change 2013 The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1535 p. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/ (accessed 13.11.2019)
- 4. Max M.D. (ed.) **2000**. *Natural gas hydrate*. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Acad. Publ., 410 p. (Oceanic and Permafrost Environments; 5). <u>https://doi.org/10.1007/978-94-011-4387-5</u>

Статья (или монографическая работа) в периодическом издании

- Blunden J., Arndt D.S. (eds) 2017. State of the Climate in 2016. Bull. of the American Meteorological Society, 98(8): Si–S277. https://doi.org/10.1175/2017BAMSStateoftheClimate.1
- Elliott S., Maltrud M., Reagan M., Moridis G., Cameron-Smith P. 2011. Marine methane cycle simulations for the period of early global warming. *J. of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G1): G01010, 13 p. <u>https://doi.org/10.1029/2010jg001300</u>
- 7. Pletchov P.Y., Gerya T.V. **1998**. Effect of H₂O on plagioclase-melt equilibrium. *Experiment in Geosciences*, 7(2): 7–9. URL: <u>http://library.iem.ac.ru/exper/v7_2/khitar.html#pletchov</u> (accessed 14.11.2019).

Статья, опубликованная в русской и английской версиях журнала

8. Щербаков В.Д., Некрылов Н.А., Савостин Г.Г., Попов Д.В., Дирксен О.В. **2017**. Состав расплавных включений в минералах тефр почвенно-пирокластического чехла острова Симушир. Вестник Москов. ун-та, Серия 4, Геология, 6: 35–45.

Shcherbakov V.D., Nekrylov N.A., Savostin G.G., Popov D.V., Dirksen O.V. 2018. The composition of melt inclusions in phenocrysts in tephra of the Simushir Island, Central Kuriles. *Moscow University Geology Bull.*, 73(1): 31–42. <u>https://doi.org/10.3103/s014587521801009x</u> Статья с англоязычными метаданными, приведенными в источнике

 Рыбин А.В., Чибисова М.В., Смирнов С.З., Мартынов Ю.А., Дегтерев А.В. 2018. Петрохимические особенности вулканических комплексов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова). Геосистемы переходных зон, 2(4): 377–385. <u>https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.377-385</u>
Rybin A.V., Chibisova M.V., Smirnov S.Z., Martynov Yu.A., Degterev A.V. 2018. Petrochemical features of volcanic

Rybin A.V., Chibisova M.V., Smirnov S.Z., Martynov Yu.A., Degterev A.V. **2018.** Petrochemical features of Volcanic complexes of Medvezh'ya caldera (Iturup Island, Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 377–385. (In Russ.).

Статья в сборнике статей или материалов конференции, глава в монографии

- Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В. 2016. О возможной границе между Амурской и Охотской микроплитами на Сахалине. В кн.: Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы 4-й Тектонофиз. конф., 3–7 окт. 2016, Москва. М.: ИФЗ РАН, т. 1: 256–263.
- 11. Grebennikova T.A. **2011.** Diatom flora of lakes, ponds and streams of Kuril Islands. In: *Diatoms: Ecology and Life Cycle*. New York: Nova Publ., 93–124.
- Hinrichs K.U., Boetius A. 2002. The anaerobic oxidation of methane: new insights in microbial ecology and biogeochemistry. In: Wefer G., Billett D., Hebbeln D. et al. (eds) Ocean Margin Systems. Berlin, Heidelberg, Springer, 457–477.

Патент

13. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В., Фирстов П.П. **2014**. Сигнализатор изменений главных компонент: пат. RU *141416*. № 2013147112; заявл. 22.10.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.

Интернет-ресурс

- 14. Кондратьев В.Б. **2011**. Глобальная фармацевтическая промышленность = The global pharmaceutical industry. URL: http://perspektivy.info/rus/ekob/2011-07-18.html (дата обращения 23.06.2013).
- 15. NGDC: Tsunami Data and Information. URL: https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml (accessed 29.09.2019).

Составитель Г.Ф. Низяева

Тематический и авторский указатели статей, опубликованных в журнале в 2020 г. Тематический указатель

Геотектоника и геодинамика	
<i>Никитина М.А., Родкин М.В.</i> Среднеглубинные землетрясения и связь сейсмичности зоны субдукции с мета- морфизмом и глубинным флюидным режимом для Северного острова Новой Зеландии https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.103-115	2020, 1: 103–115
<i>Булгаков Р.Ф., Сеначин В.Н., Сеначин М.В.</i> Плотностные и реологические неоднородности мантии активных океанических окраин западного сектора Тихого океана и зоны Курильского глубоководного желоба https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.116-130	2020, 1: 116–130
Сим Л.А., Каменев П.А., Богомолов Л.М. Новые данные о новейшем напряженном состоянии зем-ной коры острова Сахалин (по структурно-геоморфологическим индикаторам тектонических напряжений) https://doi. org/10.30730/gtrz.2020.4.4.372-383	2020, 4: 372–383
Общая и региональная геология. Петрология. Вулканология	
Общая и региональная геология. Петрология. Вулканология Фирстов П.П., Попов О.Е., Лобачева М.А., Будилов Д.И., Акбашев Р.Р. Волновые возмущения в ат-мосфере, сопровождавшие извержение вулкана Райкоке (Курильские острова) 21–22 июня 2019 г. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.071-081.082-092	2020, 1: 71–92
<i>Дегтерев А.В., Чибисова М.В.</i> Вулканическая активность на Курильских островах в 2019 г. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.093-102	2020, 1: 93–102
<i>Никитенко О.А., Ершов В.В.</i> Гидрогеохимическая характеристика проявлений грязевого вулканизма на острове Сахалин https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.321-335.336-350	2020, 3: 321–350
<i>Романюк Ф.А., Дегтерев А.В.</i> Изменение конфигурации береговой линии о. Райкоке после экспло-зивного извержения 21–25 июня 2019 г. (центральные Курильские острова) https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.351-358	2020, 3: 351–358
<i>Дегтерев А.В., Чибисова М.В.</i> Активизация вулкана Эбеко в мае-июле 2020 г. (о. Парамушир, Северные Курилы) https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.500-505	2020, 4: 500–505
Геофизика, геофизические методы поиска полезных ископаемых. Сейсмология, методы прогноза	
Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2019 году https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.146-159	2020, 2: 146–159
<i>Закупин А.С., Богинская Н.В.</i> Среднесрочные оценки сейсмической опасности на о. Сахалин методом LURR: новые результаты https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.160-168.169-177	2020, 2: 160–177
<i>Сычева Н.А.</i> Тензор сейсмического момента и динамические параметры землетрясений Центрального Тянь- Шаня https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.178-191.192-209	2020, 2: 178–209
Фирстов П.П., Макаров Е.О. Долговременные тренды подпочвенного радона на Камчатке как ин-дикаторы подготовки землетрясений с М > 7.5 в северо-западном обрамлении Тихого океана https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.270-278.279-287	2020, 3: 270–287
<i>Буданов Л.М., Сенчина Н.П., Шнюкова О.М., Горелик Г.Д.</i> Исследование палеовреза с помощью гравиметрических наблюдений https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.288-296	2020, 3: 288–296
Кирилов А.А., Сычев В.Н. Изменения полного электронного содержания ионосферы во время про-хождения геомагнитной бури 31 августа – 3 сентября 2019 года по данным GPS https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.297-304	2020, 3: 297–304
<i>Лексин В.К.</i> Применение сейсморазведки высокого разрешения для поисков локальных газовых аномалий на Южно-Киринском нефтегазоконденсатном месторождении https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.384-392	2020, 4: 384–392
<i>Сычева Н.А., Богомолов Л.М.</i> О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446	2020, 4: 393–446
<i>Королев Ю.П., Королев П.Ю.</i> Оперативный прогноз локальных цунами по данным ближайших к очагам глубоководных станций, содержащим шумы сейсмического происхождения https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473	2020, 4: 447–473
Семенова Е.П., Богинская Н.В., Костылев Д.В. Углегорское землетрясение 13 сентября 2020 года (о. Сахалин): предпосылки возникновения и результаты наблюдений в эпицентральной зоне https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.474-485	2020, 4: 474–485
<i>Костылев Д.В., Богинская Н.В.</i> Сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов на Сахалине и южных Курильских островах (о. Кунашир) https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.486-499	2020, 4: 486–499

Геоморфология и эволюционная география	
<i>Булгаков Р.Ф., Афанасьев В.В., Игнатов Е. И.</i> Гидроизостазия как фактор, повлиявший на ход по- слеледниковой трансгрессии на шельфе и побережье Приморья, по результатам численного мо-делирования https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.210-219.220-229	2020, 2: 210–229
Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А, Макарова Т.Р., Корнюшенко Т.В., Кудрявцева Е.П., Ганзей К.С., Судьин В.В., А. А. Харламов А.А. Палеоозеро острова Шкота: природный архив изменений климата и ландшафтов https://doi. org/10.30730/gtrz.2020.4.2.230-24	2020, 2: 230–249
<i>Булгаков Р.Ф., Афанасьев В.В.</i> Эффект гидроизостатической компенсации в зависимости от ширины шельфа на примере моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.305-312.313-320	2020, 3: 305–320
<i>Козлов Д.Н.</i> Самые крупные озера Курильских островов: морфометрия и географическое распределение (материалы к базе данных) https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.506-513	2020, 4: 506–513
Океанология	
Ковалев П.Д., Ковалев Д. П., Шишкин А.А. Особенности режима волнения в бухтах и на побережье острова Шикотан Малой Курильской гряды https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.250-258	2020, 2: 250–258
<i>Королев Ю.П., Королев П.Ю.</i> Моделирование процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цуна- ми 25.03.2020 https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.259-265	2020, 2: 259–265
Шакиров Р.Б., Мау С., Мишукова Г.И., Обжиров А.И., Шакирова М.В., Мишукова О.В. Особенности потоков метана в западной и восточной Арктике: обзор. Часть I https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.004-025	2020, 1: 4–25
<i>Королев Ю.П., Королев П.Ю.</i> Волны цунами: длинные или диспергирующие? https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.026-034	2020, 1: 26–34
Шевченко Г.В., Частиков В.Н., Цой А.Т. Вихревые образования у юго-восточного побережья о. Са-халин https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.035-045	2020, 1: 35–45
Разжигаева Н.Г., Гребенникова Т.А., Ганзей Л.А., Горбунов А.О., Пономарев В.И., Климин М.А., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Петров А.Ю. Реконструкция палеотайфунов и повторяемости экстремальных паводков на юге острова Сахалин в среднем-позднем голоцене https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.046-070	2020,1: 46–70
Геоэкология	
<i>Музыченко Л.Е., Казакова Е.Н.</i> Антропогенные сели на Сахалине https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.046-070	2020, 3: 359–368
<i>Жарков Р.В.</i> Термальные воды вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова) и их рекреаци-онно-туристский потенциал https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.514-525	2020, 4: 514–525

Авторский указатель

Автор(ы). Название	Номер, страницы
Акбашев Р.Р. См. Фирстов П.П Волновые	1
Арсланов Х.А. См. Разжигаева Н.Г Реконструкция	1
Афанасьев В.В. См. Булгаков Р.Ф.	2, 3
Богинская Н.В. См. Закупин А.С. Она же. См. Костылев Д.В. Она же. См. Семенова Е.П.	2,4
Богомолов Л.М. См. Сим Л.А. Он же. См. Сычева Н.А.	4
БУДАНОВ Л.М., СЕНЧИНА Н.П., ШНЮКОВА О.М., ГОРЕЛИК Г.Д. Исследование палеовреза с помощью гравиметрических наблюдений	3, 288–296
Будилов Д.И. См. Фирстов П.П Волновые	1
БУЛГАКОВ Р.Ф., АФАНАСЬЕВ В.В. Эффект гидроизостатической компенсации в зависимости от ширины шельфа на примере моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря	3, 305–320
БУЛГАКОВ Р.Ф., АФАНАСЬЕВ В.В., ИГНАТОВ Е.И. Гидроизостазия как фактор, повлиявший на ход после- ледниковой трансгрессии на шельфе и побережье Приморья, по результатам численного моделирования	2, 210–229
БУЛГАКОВ Р.Ф., СЕНАЧИН В.Н., СЕНАЧИН М.В. Плотностные и реологические неоднородности мантии активных океанических окраин западного сектора Тихого океана и зоны Курильского глубоководного желоба	1, 116–130
Ганзей Л.А. См. Разжигаева Н.Г Реконструкция Она же. См. Разжигаева Н.Г Палеоозеро	1,2

Ганзей К.С. См. Разжигаева Н.Г Палеоозеро	2
Горбунов А.О. См. Разжигаева Н.Г Реконструкция	1
Горелик Г.Д. См. Буданов Л.М.	3
Гребенникова Т.А. См. Разжигаева Н.Г Реконструкция	1
Дегтерев А.В. См. Романюк Ф.А.	3
ДЕГТЕРЕВ А.В., ЧИБИСОВА М.В. Активизация вулкана Эбеко в мае-июле 2020 г. (о. Парамушир, Северные Курилы)	4, 500–505
ДЕГТЕРЕВ А.В., ЧИБИСОВА М.В. Вулканическая активность на Курильских островах в 2019 г.	1, 93–102
Ершов В.В. См. Никитенко О.А.	3
ЖАРКОВ Р.В. Термальные воды вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова) и их рекреационно-ту- ристский потенциал	4, 514–525
ЗАКУПИН А.С., БОГИНСКАЯ Н.В. Среднесрочные оценки сейсмической опасности на о. Сахалин методом LURR: новые результаты	2, 160–177
Игнатов Е.И. См. Булгаков Р.Ф.	2
Казакова Е.Н. См. Музыченко Л.Е.	3
Каменев П.А. См. Сим Л.А.	4
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	3, 297–304
Климин М.А. См. Разжигаева Н.Г Реконструкция	1
Ковалев Д.П. См. Ковалев П.Д.	2
КОВАЛЕВ П.Д., КОВАЛЕВ Д.П., ШИШКИН А.А. Особенности режима волнения в бухтах и на побережье острова Шикотан Малой Курильской гряды	2, 250–258
Коваленко Н.С. См. Сафонов Д.А.	2
КОЗЛОВ Д.Н. Самые крупные озера Курильских островов: морфометрия и географическое распределение (материалы к базе данных)	4, 506–513
Корнюшенко Т.В. См. Разжигаева Н.Г Палеоозеро	2
Королев П.Ю. См. Королев Ю.П.	1, 2, 4
КОРОЛЕВ Ю.П., КОРОЛЕВ П.Ю. Волны цунами: длинные или диспергирующие?	1, 26–34
КОРОЛЕВ Ю.П., КОРОЛЕВ П.Ю. Моделирование процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами 25.03.2020	2, 259–265
КОРОЛЕВ Ю.П., КОРОЛЕВ П.Ю. Оперативный прогноз локальных цунами по данным ближайших к очагам глубоководных станций, содержащим шумы сейсмического происхождения	4, 447–473
Костылев Д.В. См. Сафонов Д.А. Он же. См. Семенова Е.П.	2, 4
КОСТЫЛЕВ Д.В., БОГИНСКАЯ Н.В. Сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов на Сахалине и южных Курильских островах (о. Кунашир)	4, 486–499
Кудрявцева Е.П. См. Разжигаева Н.Г Палеоозеро	2
ЛЕКСИН В.К. Применение сейсморазведки высокого разрешения для поисков локальных газовых аномалий на Южно-Киринском нефтегазоконденсатном месторождении	4, 384–392
Лобачева М.А. См. Фирстов П.П Волновые	1
Макаров Е.О. См. Фирстов П.П Долговременные	3
Макарова Т.Р. См. Разжигаева Н.Г Палеоозеро	2
Максимов Ф.Е. См. Разжигаева Н.Г Реконструкция	1
Мау С. См. Шакиров Р.Б.	1
Мишукова Г.И. См. Шакиров Р.Б.	1
Мишукова О.В. См. Шакиров Р.Б.	1
МУЗЫЧЕНКО Л.Е., КАЗАКОВА Е.Н. Антропогенные сели на Сахалине	3, 359–368
НИКИТЕНКО О.А., ЕРШОВ В.В. Гидрогеохимическая характеристика проявлений грязевого вулканизма на острове Сахалин	3, 321–350

НИКИТИНА М.А., РОДКИН М.В. Среднеглубинные землетрясения и связь сейсмичности зоны субдукции с метаморфизмом и глубинным флюидным режимом для Северного острова Новой Зеландии	1, 103–115
Обжиров А.И. См. Шакиров Р.Б.	1
Петров А.Ю. См. Разжигаева Н.Г Реконструкция	1
Пономарев В.И. См. Разжигаева Н.Г Реконструкция	1
Попов О.Е. См. Фирстов П.П Волновые	1
РАЗЖИГАЕВА Н.Г., ГАНЗЕЙ Л.А., МАКАРОВА Т.Р., КОРНЮШЕНКО Т.В., КУДРЯВЦЕВА Е.П., ГАНЗЕЙ К.С., СУДЬИН В.В., ХАРЛАМОВ А.А. Палеоозеро острова Шкота: природный архив изменений климата и ланд- шафтов	2, 230–249
РАЗЖИГАЕВА Н.Г., ГРЕБЕННИКОВА Т.А., ГАНЗЕЙ Л.А., ГОРБУНОВ А.О., ПОНОМАРЕВ В.И., КЛИМИН М.А., АРСЛАНОВ Х.А., МАКСИМОВ Ф.Е., ПЕТРОВ А.Ю. Реконструкция палеотайфунов и повторяемости экстремальных паводков на юге острова Сахалин в среднем–позднем голоцене	1, 46–70
Родкин М.В. См. Никитина М.А.	1
РОМАНЮК Ф.А., ДЕГТЕРЕВ А.В. Изменение конфигурации береговой линии о. Райкоке после эксплозивного извержения 21–25 июня 2019 г. (центральные Курильские острова)	3, 351–358
САФОНОВ Д.А., КОСТЫЛЕВ Д.В., ФОКИНА Т.А., КОВАЛЕНКО Н.С. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2019 году	2, 146–159
СЕМЕНОВА Е.П., БОГИНСКАЯ Н.В., КОСТЫЛЕВ Д.В. Углегорское землетрясение 13 сентября 2020 года (о. Сахалин): предпосылки возникновения и результаты наблюдений в эпицентральной зоне	4, 474–485
Сеначин В.Н. См. Булгаков Р.Ф.	1
Сеначин М.В. См. Булгаков Р.Ф.	1
Сенчина Н.П. См. Буданов Л.М.	3
СИМ Л.А., КАМЕНЕВ П.А., БОГОМОЛОВ Л.М. Новые данные о новейшем напряженном состоянии земной коры острова Сахалин (по структурно-геоморфологическим индикаторам тектонических напряжений)	4, 372–383
Судьин В.В. См. Разжигаева Н.Г Палеоозеро	2
Сычев В.Н. См. Кирилов А.А.	3
СЫЧЕВА Н.А. Тензор сейсмического момента и динамические параметры землетрясений Центрального Тянь-Шаня	2, 178–209
СЫЧЕВА Н.А., БОГОМОЛОВ Л.М. О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии	4, 393–446
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	3, 270–287
ФИРСТОВ П.П., ПОПОВ О.Е., ЛОБАЧЕВА М.А., БУДИЛОВ Д.И., АКБАШЕВ Р.Р. Волновые возмущения в атмосфере, сопровождавшие извержение вулкана Райкоке (Курильские острова) 21–22 июня 2019 г.	1, 71–92
Фокина Т.А. См. Сафонов Д.А.	2
Харламов А.А. См. Разжигаева Н.Г Палеоозеро	2
Цой А.Т. См. Шевченко Г.В.	1
Частиков В.Н. См. Шевченко Г.В.	1
Чибисова М.В. См. Дегтерев А.В.	1,4
ШАКИРОВ Р.Б., МАУ С., МИШУКОВА Г.И., ОБЖИРОВ А.И., ШАКИРОВА М.В., МИШУКОВА О.В. Особенности потоков метана в западной и восточной Арктике: обзор. Часть І	1, 4–25
Шакирова М.В. См. Шакиров Р.Б.	1
ШЕВЧЕНКО Г.В., ЧАСТИКОВ В.Н., ЦОЙ А.Т. Вихревые образования у юго-восточного побережья о. Сахалин	1, 35–45
Шишкин А.А. См. Ковалев П.Д.	2
Шнюкова О.М. См. Буданов Л.М.	3

Topical index of articles published in the Journal in 2020

Geotectonics and geodynamics	
<i>Nikitina M.A., Rodkin M.V.</i> Intermediate-depth earthquakes and the connection of the seismicity with metamorphism and deep fluid regime in subduction zone for the North Island of New Zealand https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.103-115	2020, 1: 103–115
<i>Bulgakov R.F., Senachin V.N., Senachin M.V.</i> Density and rheological inhomogeneities in the mantle of the active oceanic margins of western part of Pacific Ocean and the Kuril deep-sea trench area https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.116-130	2020, 1: 116–130
<i>Sim L.A., Kamenev P.A., Bogomolov L.M.</i> New data on the latest stress state of the earth's crust on Sakhalin Island (based on structural and geomorphological indicators of tectonic stress) https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.372-383	2020, 4: 372–383
General and regional geology. Petrology. Volcanology	
<i>Nikitenko O.A., Ershov V.V.</i> Hydrogeochemical characteristics of mud volcanism manifestations on Sakhalin Island https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.321-335.336-350	2020, 3: 321–350
<i>Romanyuk F.A., Degterev A.V.</i> Transformation of the coastline of Raikoke Island after the explosive eruption on June 21–25, 2019 (Central Kuril Islands) https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.351-358	2020, 3: 351–358
<i>Firstov P.P., Popov O.E., Lobacheva M.A., Budilov D.I., Akbashev R.R.</i> Wave perturbations in the atmosphere accompanied the eruption of the Raykoke volcano (Kuril Islands) June 21–22, 2019 https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.071-081.082-092	2020, 1: 71–92
Degterev A.V., Chibisova M.V. The volcanic activity at the Kuril Islands in 2019 https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.093-102	2020, 1: 93–102
<i>Degterev A.V., Chibisova M.V.</i> Activation of the Ebeko volcano in May–July, 2020 (Paramushir Island, Northern Kuril Islands) https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.500-505	2020, 4: 500–505
Geophysics, geophysics methods of the mineral prospecting. Seismology, prediction methods	
<i>Firstov P.P., Makarov E.O.</i> 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 https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.270-278.279-287	2020, 3: 270–287
<i>Budanov L.M., Senchina N.P., Shnyukova O.M., Gorelik G.D.</i> Study of paleochannels by means of gravimetric observations https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.288-296	2020, 3: 288–296
<i>Kirilov A.A., Sychev V.N.</i> Changes in the total electron content of the ionosphere during a geomagnetic storm August 31 – September 3, 2019 according to GPS data https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.297-304	2020, 3: 297–304
Safonov D.A., Kostylev D.D., Fokina T.A., Kovalenko N.S. Seismicity of the South Far East of Russia in 2019 https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.146-159	2020, 2: 146–159
Zakupin A.S., Boginskaya N.V. Mid-term assessments of the seismic hazard on Sakhalin Island by the LURR method: new results https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.160-168.169-177	2020, 2: 160–177
<i>Sycheva N.A.</i> Seismic moment tensor and dynamic parameters of earthquakes in the Central Tien Shan https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.178-191.192-209	2020, 2: 178–209
<i>Leksin V.K.</i> Application of high resolution seismic to search for local gas anomalies in the South Kirinskoye oil and gas condensate field https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.384-392	2020, 4: 384–392
<i>Sycheva N.A., Bogomolov L.M.</i> On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446	2020, 4: 393–446
<i>Korolev Yu.P., Korolev P.Yu.</i> Short-term forecast of local tsunamis based on data containing seismic noise from deep-ocean stations closest to the sources https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473	2020, 4: 447–473
<i>Semenova E.P., Boginskaya N.V., Kostylev D.V.</i> Uglegorsk earthquake on September 13, 2020 (Sakhalin Island): preconditions for the occurrence and the results of observations in the epicentral zone https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.474-485	2020, 4: 474–485
<i>Kostylev D.V., Boginskaya N.V.</i> Seismoacoustic observations using molecular-electronic hydrophones on Sakhalin and the South Kuril Islands (Kunashir Island) https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.486-499	2020, 4: 486–499
Geomorphology and evolution geography	
Bulgakov R.F., Afanas'ev V.V., Ignatov E.I. Effect of hydroisostasy on postglacial transgression on the shelf and coast of Primorye as revealed by computer modelling https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.210-219.220-229	2020, 2: 210–229

Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Makarova T.R., Kornyushenko T.V., Kudryavtseva E.P., Ganzei K.S., Sudin V.V., Kharlamov A.A. Paleolake of Shkot Island: natural archive of climatic and landscape changes https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.230-249	2020, 2: 230–249
<i>Bulgakov R.F., Afanas'ev V.V.</i> Effects of hydroisostatic compensation depending on the shelf width on the example of the Laptev and East Siberian seas https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.305-312.313-320	2020, 3: 305–320
<i>Kozlov D.N.</i> The largest lakes of the Kuril Islands: morphometry and geographical distribution (materials for the database) https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.506-513	2020, 4: 506–513
Oceanology	
<i>Kovalev P.D., Kovalev D.P., Shishkin A.A.</i> Study of waves in the bays and on the coast of Shikotan Island in the Lesser Kuril ridge https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.250-258	2020, 2: 250–258
<i>Korolev Yu.P., Korolev P.Yu.</i> Simulation of the process of the short-term forecasting of the 25.03.2020 Onekotan tsunami https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.259-265	2020, 2: 259–265
<i>Shakirov R.B., Mau S., Mishukova G.I., Obzhirov A.I., Shakirova M.V., Mishukova O.V.</i> The features of methane fluxes in the western and eastern Artcic: A review. Part I (In English) https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.004-025	2020,1: 4–25
<i>Korolev Yu.P., Korolev P.Yu.</i> Are tsunamis long or dispersive waves? https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.026-034	2020,1: 26–34
Shevchenko G.V., Chastikov V.N., Tsoy A.T. Eddies off the southeast coast of Sakhalin Island https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.035-045	2020,1: 35-45
Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Gorbunov A.O., Ponomarev V.I., Klimin M.A., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu. Reconstruction of paleotyphoons and recurrence of extreme floods in south Sakhalin Island in Middle–Late Holocene https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.046-070	2020,1: 46–70
Geoecology	
Muzychenko L.E., Kazakova E.N. Anthropogenic debris flows in Sakhalin https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.359-368	2020, 3: 359–368
<i>Zharkov R.V.</i> Thermal waters of the Ebeko volcano (Paramushir Island, Kuril Island) and their recreation and tourism potential https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.514-525	2020, 4: 514–525

Подписной 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

