ISSN 2541-8912 eISSN 2713-2161

ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН



GEOSYSTEMS of Transition Zones 20



https://doi.org/10.30730/gtrz

ГЕОСИСТЕМЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН Том 4 № 2 2020 Март – Июнь

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)

IISSN 2541-8912 (Print), ISSN 2713-2161 (Online) GEOSYSTEMS OF TRANSITION ZONES Vol. 4 No 2 2020 March – June

Scientific journal

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

> Published since January 2017 Periodicity: Quarterly

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

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

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

The Journal is included in the List of peer reviewed scientific journals in which main research results from the dissertations of Candidates of Sciences (Ph.D) and Doctor of Sciences (Dr.Sci.) degrees should be published. Scientific specialities of dissertations and their respective branches of science are the following:

- 25.00.01. General and regional geology (Geology and Mineralogy)
- 25.00.03. Geotectonics and Geodynamics (Geology and Mineralogy)
- 25.00.04. Petrology and volcanology (Geology and Mineralogy)
- 25.00.10. Geophysics, geophysical methods of mineral exploration (Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics)
- 25.00.25. Geomorphology and evolutionary geography (Geography)
- 25.00.28. Oceanology (Geography; Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics)
- 25.00.35. Geoinformatics (Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics)25.00.36. Geoecology
- (Geology and Mineralogy; Geography) 01.02.04. Mechanics of deformable solids
- (Physics and Mathematics; Engineering)

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

Postal address

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

© ИМГиГ ДВО РАН, 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

• Левин Борис Вульфович, член-корреспондент РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, главный научный сотрудник лаборатории цунами им. С.Л. Соловьева; Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, научный руководитель

Заместитель главного редактора

- Богомолов Леонид Михайлович, д-р физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, директор, руководитель Центра коллективного пользования
- Адушкин Виталий Васильевич, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт динамики геосфер РАН; Московский физико-технический институт, Москва
- Алексанин Анатолий Иванович, д-р техн. наук, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
- Быков Виктор Геннадьевич, д-р физ.-мат. наук, Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск
- Завъялов Петр Олегович, член-корреспондент РАН, д-р геогр. наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
- Закупин Александр Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск – зам. главного редактора
- Ковалев Дмитрий Петрович, д-р физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск
- Кочарян Геворг Грантович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт динамики геосфер РАН, Москва
- Куркин Андрей Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород
- Левин Владимир Алексеевич, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток; Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- Лучин Владимир Александрович, д-р геогр. наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- Марапулец Юрий Валентинович, д-р физ.-мат. наук, доцент, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка
- Обжиров Анатолий Иванович, д-р геол.-минер. наук, профессор, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- Огородов Станислав Анатольевич, профессор РАН, д-р геогр. наук, чл.-корр. РАЕН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- Плехов Олег Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
- Прытков Александр Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск – ответственный секретарь
- Ребецкий Юрий Леонидович, д-р физ.-мат. наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва
- Родкин Михаил Владимирович, д-р физ.-мат. наук, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва
- Рыбин Анатолий Кузьмич, д-р физ.-мат. наук, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Кыргызстан
- Сасорова Елена Васильевна, д-р физ.-мат. наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
- Троицкая Юлия Игоревна, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород; Нижегородский гос. университет им Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
- Фирстов Павел Павлович, д-р физ.-мат. наук, Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский
- Шакиров Ренат Белалович, д-р геол.-минер. наук, доцент, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- Шевченко Георгий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск
- Ярмолюк Владимир Викторович, академик РАН, д-р геол.-минер. наук, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Переводчик Качесова Галина Сергеевна

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Translator Galina S. Kachesova ISSN 2541-8912 (Print)

Геосистемы переходных зон

https://doi.org/10.30730/gtrz-2020-4-2

Геофизика, Сейсмология

ISSN 2713-2161 (Online)

GEOSYSTEMS OF TRANSITION ZONES Vol. 4 No 2 2020 March - June

http://journal.imgg.ru

https://doi.org/10.30730/gtrz-2020-4-2

Geophysics, Seismology

Содержание

Д.А. Сафонов, Д.В. Костылев, Т.А. Фокина, Н.С. Ко- валенко. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2019 году	D.A. Safonov, D.V. Kostylev, T.A. Fokina, N.S. Kovalenko. Seismicity of the South Far East of Russia in 2019
А.С. Закупин, Н.В. Богинская. Среднесрочные оценки сейсмической опасности на о. Сахалин методом LURR: новые результаты	TRANSLATION A.S. Zakupin, N.V. Boginskaya. Mid-term assessments of seismic hazards on Sakhalin Island using the LURR method: new results
<i>Н.А. Сычева.</i> Тензор сейсмического момента и динамические параметры землетрясений Центрального Тянь- Шаня	TRANSLATION N.A. Sycheva. Seismic moment tensor and dynamic para- meters of earthquakes in the Central Tien Shan
Геоморфология	Geomorphology and evolutionary geography
и эволюционная география	TRANSLATION
Р.Ф. Булгаков, В.В. Афанасьев, Е.И. Игнатов, Гидрои- зостазия как фактор, повлиявший на ход послеледнико- вой трансгрессии на шельфе и побережье Приморья, по результатам численного моделирования	<i>R.F. Bulgakov, V.V. Afanas'ev, <u>E.I. Ignatov</u>. Effect of hydroisostasy on postglacial transgression on the shelf and coast of Primorye as revealed by computer modelling</i>
Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, Т.Р. Макарова, Т.В. Кор- нюшенко, Е.П. Кудрявцева, К.С. Ганзей, В.В. Судьин, А.А. Харламов. Палеоозеро острова Шкота: природный архив изменений климата и ландшафтов	N.G. Razjigaeva, L.A. Ganzey, T.R. Makarova, T.V. Ko- rnyushenko, E.P. Kudryavtseva, K.S. Ganzei, V.V. Sudin, A.A. Kharlamov. Paleolake of Shkot Island: natural archive of climatic and landscape changes
Океанология	Oceanology
П.Д. Ковалев, Д.П. Ковалев, А.А. Шишкин. Особенности режима волнения в бухтах и на побережье острова Шикотан Малой Курильской гряды	P.D. Kovalev, D.P. Kovalev, A.A. Shishkin. Study of waves in the bays and on the coast of Shikotan Island in the Lesser Kuril ridge
КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ	SHORT REPORT
Ю.П. Королев, П.Ю. Королев. Моделирование процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами	Yu.P. Korolev, P.Yu. Korolev. Simulation of the process of short-term forecasting of the 25.03.2020 Onekotan tsu-

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

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

Типография: 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б. http://www.imgg.ru

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 15,8. Уч.-изд. л. 14,7. Тираж 150 экз. Заказ 7935. Свободная цена. Подписано в печать 29.06.2020.

Подписной индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 80882 По вопросам распространения обращаться также E-mail: gtrz-journal@mail.ru

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

nami 259

Publisher: 1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022. http://www.imgg.ru

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 15,8. Number of copies 150. Order no. 7935. Free price. Date of publishing 29.06.2020.

Subscription index in catalogue of the "Rospechat" agency - 80882 The Editorial Office can also be contacted by: E-mail: gtrz-journal@mail.ru

CONTENT

http://journal.imgg.ru

Том 4 № 2 2020 Март – Июнь

УДК 550.34

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.146-159

Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2019 году

© 2020 Д. А. Сафонов^{*2}, Д. В. Костылев^{1,2}, Т. А. Фокина¹, Н. С. Коваленко¹

¹Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия ²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: d.safonov@imgg.ru

Резюме. В работе представлен обзор сейсмичности южной части Дальнего Востока России: регионов Приамурье и Приморье, Сахалинского и Курило-Охотского, основанный на предварительных данных каталогов землетрясений Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», полученных в 2019 г. Дана краткая характеристика сейсмичности регионов за прошедший год, показан ее уровень в сравнении с предыдущими годами, указаны наиболее сильные и интересные для изучения землетрясения. В сейсмическом отношении 2019 год выдался относительно спокойным во всех трех регионах, отсутствовали сейсмические события магнитудой более 6.2. Следует уделить внимание пониженному уровню сейсмической активности средних Курильских островов.

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

Для цитирования: Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2019 году. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 2, с. 146–159. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.146-159

Seismicity of the South Far East of Russia in 2019

Dmitry A. Safonov^{*2}, Dmitry V. Kostylev^{1,2}, Tatjana A. Fokina¹, Natalya S. Kovalenko¹

¹Sakhalin Branch of the FRC "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia ²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: d.safonov@imgg.ru

Abstract. This article presents an overview of the seismicity of the southern part of the Russian Far East, comprising Primorsky Krai, Sakhalin and Amur oblasts including Kuril-Okhotsk, based on preliminary data from the earthquake catalogues of the Sakhalin branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences", obtained in 2019. A brief description of the seismicity of the regions over the past year is provided, showing its level in comparison with the previous years and indicating the strongest and most seismically interesting earthquakes. In terms of seismicity, 2019 was relatively calm in all three regions, with no seismic events of magnitude greater than 6.2. Particular attention is drawn to the reduced level of seismic activity in the middle Kuril Islands.

Keywords: earthquakes, seismicity, seismic activity, earthquake focal mechanism, Amur region, Primorye, Sakhalin, Kuril-Okhotsk region.

For citation: Safonov D.A., Kostylev D.V., Fokina T.A., Kovalenko N.S. Seismicity of the South Far East of Russia in 2019. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 146–159 (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.146-159

Введение

Регистрацией сейсмических событий естественного и техногенного характера в южной части российского Дальнего Востока занимается Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Южно-Сахалинск. Традиционно и согласно границам филиалов геофизической службы [Габсатарова, 2007] эта территория делится на три региона, различающихся по уровню и характеру сейсмичности: Курило-Охотский, включающий территорию Курильских островов, прилегающую часть Тихого океана, южную и центральную части охотоморской акватории, а также о. Хоккайдо и северную часть Японского моря; Сахалинский – о. Сахалин и прилегающие акватории Охотского, Японского морей и Татарского пролива; регион Приамурье и Приморье, включающий Приморский и бо́льшую часть Хабаровского края, Амурскую и Еврейскую автономную области, а также приграничные районы Китая и прибрежную часть морей (рис. 1).

Сводная обработка землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН проводится в два этапа. На первом составляется каталог землетрясений по оперативным данным (1-3 дня с момента события), на его основе формируется ежегодный отчет. На втором этапе (в текущем и следующем году) полученные результаты уточняются, дополняются, формируется окончательный каталог. Зоны ответственности филиала по оперативным и окончательным данным несколько различаются: окончательную обработку каталога землетрясений северных Курильских островов, входящих в зону оперативной обработки СФ ФИЦ ЕГС РАН (в связи с территорией ответственности сейсмостанции Южно-Сахалинск по контролю цунамигенных землетрясений, а также необходимостью своевременного оперативного информирования о чрезвычайных ситуациях в пределах всей Сахалинской области), производит Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН. Границы зоны ответственности показаны на рис. 1.

Регулярный обзор сейсмичности зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН публи-

куется в сборниках «Землетрясения России...» (например, [Фокина и др., 2018]) с отставанием в 2 года и, более детально, в ежегодном рецензируемом журнале «Землетрясения Северной Евразии» (например, [Фокина и др., 2019; Коваленко и др., 2019]) с отставанием в 6 лет. В 2019 г. авторы регулярных публикаций в упомянутых изданиях приняли решение оперативно знакомить заинтересованных специалистов с сейсмичностью южной части Дальнего Востока РФ [Сафонов и др., 2019] на основе оперативного каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН с целью обратить внимание на наиболее интересные и заслуживающие изучения сейсмические события регионов. В работе показаны современные регистрационные возможности филиала. Перечислены наиболее сильные землетрясения по двум признакам: энергетическому (магнитудному) и макросейсмическому. Приводятся механизмы очагов сильных событий. Сравнивается уровень сейсмичности региона в 2019 г. с уровнем в предыдущие годы. Наибольшее внимание уделяется району Курильской островной дуги, в связи с высоким уровнем его сейсмичности.

В практике обработки землетрясений Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН определяется большое количество энергетических характеристик землетрясений (магнитуд, энергетических классов). Для удобства в данной работе все они по переходным формулам [Фокина и др., 2019] сведены к магнитуде по поверхностной волне $M_{\rm LH}$, обозначаемой далее просто M. Также в тексте упоминается энергетический класс С.Л. Соловьева [Соловьев, Соловьева, 1967] $K_{\rm C}$ и моментная магнитуда $M_{\rm W}$, получаемая при определении тензора сейсмического момента очага землетрясений.

Сеть сейсмологических наблюдений СФ ФИЦ ЕГС РАН

В 2019 г. сеть станций сейсмологических наблюдений в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН не претерпела изменений по сравнению с предыдущим годом [Сафонов и др., 2019]. Она состояла из 44 пунктов инструментальных непрерывных наблюдений, включая 34 стационарных и 10 автономных



Рис. 1. Расположение стационарных сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2019 г. 1 – информационно-вычислительный центр на станции «Южно-Сахалинск»; 2 – станции, оборудованные в качестве основного датчика широкополосными велосиметрами; 3 – станции, оборудованные в качестве основного датчика акселерометрами либо короткопериодными велосиметрами; 4 – зона ответственности СФ за данные окончательного каталога; 5 – зона ответственности СФ за данные оперативных наблюдений. На врезке – станция «Южно-Сахалинск» и выносные опорные пункты наблюдений южного Сахалина.

Figure 1. Stationary seismic stations of the SB FRC UGS RAS location-map in 2019. 1 – data-processing center at the "Yuzhno-Sakhalinsk" station; 2 – stations equipped with broadband velocimeters as the main sensor; 3 – stations equipped with accelerometers or short-period velocimeters as the main sensor; 4 – SB responsibility zone for the data of final catalog; 5 – SB responsibility zone for the data of operative observation. The sidebar shows the Yuzhno-Sakhalinsk station and remote observation points of southern Sakhalin.

полевых (локальная сеть на юге о. Сахалин).

На материковой части зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН (регион Приамурье и Приморье) расположено 10 стационарных пунктов наблюдений и один за границей этой зоны - сейсмостанция «Охотск» (ОКНТ) (рис. 1). Сейсмостанция «Кировский» (KROS) в 2018-2019 гг. не работала по техническим причинам. На о. Сахалин расположено 16 стационарных наблюдательных пунктов, из них 12 автоматических, в том числе 8 выносных пунктов опорной станции «Южно-Сахалинск» (YSS) (рис. 1, врезка). Регистрируемые данные всех выносных пунктов обрабатываются в реальном времени на сейсмостанции «Южно-Сахалинск». Помимо этого на юге острова действует локальная сеть из 10 автономных полевых станций для детального наблюдения

за сейсмичностью (комплект аналогичной аппаратуры есть и на станции «Южно-Сахалинск»), данные которой недоступны в режиме реального времени, их обрабатывают в СФ ФИЦ ЕГС РАН позднее по мере поступления. На Курильских островах находятся 7 стационарных наблюдательных пунктов, из них 4 автоматических. Все пункты оборудованы цифровой аппаратурой. Общее число сейсмометров составляет 61. Из них 25 – акселерометры, 22 – широкополосные велосиметры, 14 – короткопериодные велосиметры.

Отдельно стоит выделить сеть станций сильных движений (ССД) СФ ФИЦ ЕГС РАН. Наличие достаточно разветвленной сети акселерометров на Сахалине и южных Курильских островах позволяет СФ ФИЦ ЕГС РАН проводить оперативную оценку интенсивно-



Рис. 2. Положение станций сильных движений и пример сейсмического события 13.02.2020 в районе южных Курильских островов (звезда – эпицентр) с оценкой макросейсмической интенсивности в пунктах наблюдений. **Figure 2.** The position of the strong motion stations and an example of the 13.02.2020 seismic event in the area of the southern Kuril Islands (star – epicenter) with an estimate of the macroseismic intensity at the observation points.

сти произошедших землетрясений в режиме близком к реальному времени. Для этого при оперативной обработке землетрясения формируется отчет о параметрах события в каждом пункте установки ССД, производится расчет балльности по шкале МСК-64 [ГОСТ 34511-2018..., 2019] и результат представляется в графическом виде. Пример отчета о сильном событии (землетрясении 13 февраля 2020 г., M = 7.0) представлен на рис. 2.

Также в систему регистрации и обработки данных СФ ФИЦ ЕГС РАН в режиме ре-

ального времени включены 60° данные станций ДВО РАН и ФИЦ ЕГС РАН на территории Дальневосточного федерального округа (17 станций) и данные семи станций Хоккайдского университета, расположенных в префектуре Хоккайдо (Япония).

Оценка регистрационных возможностей сейсмологической сети в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН и прилегающей территории, а также расположение сейсмических станций, включенных в систему сбора, приведены на рис. 3.

Текущая конфигурация сети сейсмических станций, с учетом установленного оборудования и привлечения в оперативном режиме данных станций соседних регионов, позволяет обеспечить на большей части зоны ответственности возможность регистрации как минимум тремя сейсмостанциями (что необходимо для корректного определения эпицентра) землетрясений начиная с представительной магнитуды $M_{\rm min} = 4.0$. Исключение составляют центральная часть Охотского, северная часть Японского моря, район средних Курильских островов и приграничная часть Приамурья, где представительной можно считать магнитуду



Рис. 3. Оценка регистрационных возможностей сети сбора данных СФ ФИЦ ЕГС РАН в зоне ответственности [Шулаков, Мурыськин, 2019]. Показаны изолинии M_{\min} .

Figure 3. Assessment of the registration capabilities of the data collection network of the SB FRC UGS RAS in the responsibility zone [Shulakov, Murys'kin, 2019]. The M_{min} isolines are shown.

событий $M_{\min} = 4.5$. Благодаря более плотной сети сейсмостанций, а также доступу к короткопериодным станциям Хоккайдского университета, на части Южных Курил и территории Сахалинского региона порог уверенной регистрации составляет $M_{\min} = 3.5$.

Краткая характеристика отдельных землетрясений региона в 2019 г.

В данной работе используется информация о сейсмичности территории главным образом из оперативного каталога землетрясений СФ ФИЦ ЕГС РАН, пополняемого в течение 2–3 дней непосредственно после сейсмических событий. По итогам 2019 г. в нем содержатся параметры 1054 землетрясений, из которых 988 произошли в Курило-Охотском регионе, 50 – в Сахалинском регионе, 16 – в Приамурье и Приморье. Однако к моменту написания статьи были определены параметры всех землетрясений М ≥ 2.6 с эпицентрами в Приамурье и Приморье (предварительный каталог по итогам года), так что их общее количество в данном регионе увеличилось до 32. Карта эпицентров событий показана на рис 4.

На территории Приамурья и Приморья в 2019 г. с учетом предварительного каталога определены параметры 24 землетрясений с гипоцентрами в земной коре и 8 мантийных землетрясений с гипоцентрами в зоне субдукции Тихоокеанской литосферной плиты под территорию региона (рис. 4). В сейсмическом отношении 2019 год для региона Приамурье и Приморье выдался спокойным, без сильных ($M \ge 5.0$) землетрясений. По сравнению с многолетними значениями [Коваленко и др., 2019], последние три года (2017-2019 гг.) наблюдается снижение уровня сейсмической активности глубокофокусных (H > 200 км) землетрясений. Число и энергия коровых (H = 10-40 км) событий также остаются достаточно низкими, в 2019 г. меньше



Рис. 4. Карта эпицентров землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2019 г. *М* – магнитуда по поверхностной волне *M*_{LH}, *H* – глубина гипоцентра, км; 1 – сейсмическая станция; 2 – границы регионов. Номера эпицентров согласно табл. 1.

Figure 4. Earthquakes' epicenters map in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2019. M – surface wave magnitude M_{LH} , H – hypocenter depth, km; 1 – seismic station; 2 – region borders. Epicenters' numbers are in accordance with the table 1.

значений предыдущих 10 лет (рис. 5). Эпицентры наиболее значительных коровых землетрясений 2019 г. расположены в западной части региона (\mathbb{N} 1, 2 на рис. 4 и в табл. 1): 6 мая в 18:10 UTC (M = 4.1; H = 10 км) вблизи Российско-Китайской границы; 22 июля в 13:08 UTC (M = 4.1; H = 12 км) восточнее Зейского водохранилища, в хребте Соктахан. Данных об ощутимости землетрясений региона в 2019 г. не поступало.

Для Сахалинского региона 2019 год также был сейсмически спокойным, хотя по сравнению с 2018 г. количество и максимальная магнитуда зарегистрированных землетрясений оказались выше [Сафонов и др., 2019]. Региональной сейсмической сетью зарегистрированы и оперативно обработаны записи 50 землетрясений, 6 из которых мантийные – произошли в Курило-Камчатской сейсмофокальной зоне под территорией Сахалинского региона. Из 44 коровых

землетрясений 10 вызвали ощутимые колебания в населенных пунктах о. Сахалин. Суммарная сейсмическая энергия коровых землетрясений (H = 10-30 км) близка к средним значениям прошелшего десятилетия (рис. 5), энергия глубокофокусных событий региона (H > 250 км) в 2019 г. несколько ниже средних многолетних значений. По энергетическому (магнитудному) критерию наиболее сильными в 2019 г. стали коровые события 23 июня в 21:01 UTC (M = 4.9; H = 25 км) с эпицентром на северо-восточном шельфе острова, 16 ноября в 22:30 UTC (M = 4.6; H = 9 км) с эпицентром в Охотском море севернее о. Сахалин (№ 3, 4 на рис. 4 и в табл. 1), а также два мантийных землетрясения с эпицентрами южнее о. Сахалин: 31 мая в 05:04 UTC (*M* = 4.9; *H* = 305 км; № 5 на рис. 4, табл. 1) и 28 августа в 01:29 UTC (*M* = 4.7; *H* = 319 км; № 6 на рис. 4, табл. 1), однако ощутимых сотрясений эти события

Таблица 1. Наиболее сильные землетрясения зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН по оперативным данным 2019 г.

<i>Table 1</i> . The data 2019	e most strong	earthquakes	of the SE	B FRC UC	GS RAS r	esponsibility	zone accordi	ng to operat	ional
						1			

Mo	Дата/Date	Время/time t ₀	o ⁰ N	20 E	U m	М	Интенсивность сотрясений в населенных	
JNO	day.mon.yr	h:min:s	φ,Ν	λ, E	П, КМ	M	пунктах, балл / Intensity, points	
	Регион Приамурье и Приморье / Amur-Primorye region							
1	06.05.2019	18:10:54.7	51.80	126.85	10	4.1		
2	22.07.2019	13:08:22.2	53.97	128.10	12	4.1		
	Cахалинский регион / Sakhalin region							
3	23.06.2019	21:01:28.1	55.67	143.25	25	4.9		
4	16.11.2019	22:30:37.1	53.11	143.40	9	4.6		
5	31.05.2019	05:04:40.3	45.60	143.21	305	4.9		
6	28.08.2019	01:29:26.8	45.49	142.37	319	4.7		
7	8.06.2019	14:20:58.2	51.37	142.26	10	4.3	Арги-Паги, 3–4	
8	6.08.2019	17:40:42.1	47.71	143.83	12	4.6	Макаров, 3–4; Стародубское, 3; Тихая, 2	
	Курило-Охотский регион / Kuril-Okhotsk region							
9	21.02.2019	12:22:39.9	42.63	141.91	54	5.6		
10	02.03.2019	03:22:55.2	42.01	147.05	50	6.0	Южно-Курильск, 3–4; Горячий Пляж, Малокурильское, 3	
11	26.05.2019	22:10:21.1	50.15	156.82	70	5.8	Северо-Курильск, 4	
12	12.06.2019	00:54:51.6	49.50	157.24	97	5.8	Северо-Курильск, 2	
13	20.11.2019	08:26:06.4	53.01	154.16	525	6.2		
14	05.12.2019	12:38:26.0	49.55	156.50	60	5.9	Северо-Курильск, 4	
15	03.12.2019	23:25:02.1	42.94	148.48	11	5.5	Малокурильское, 3-4	
16	18.09.2019	02:54:26.3	44.34	148.34	55	4.3	Горный, Горячие Ключи, 4–5; Курильск, Рейдово, 4; Южно-Курильск, Горячий Пляж; Малокурильское, 2	
17	23.11.2019	12:58:10.2	43.72	147.33	68	4.6	Малокурильское, 5; Южно-Курильск, Горячий Пляж, Лагунное, Головнино, 4; Крабозаводское, 3–4; Курильск, 2–3	



Рис. 5. Суммарная сейсмическая энергия землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2009–2019 гг. Figure 5. Total seismic energy of the earthquakes in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2009–2019.

не вызвали. Наибольшая интенсивность сотрясений зарегистрирована при землетрясениях 8 июня в 14:20 UTC (M = 4.3; H = 9 км; $N \ge 7$ на рис. 4 и 7, табл. 1), вызвавшем колебания в 3–4 балла в пос. Арги-Паги в северной части острова, а также 6 августа в 17:40 UTC (M = 4.6; H = 12 км; $N \ge 8$ на рис. 4 и 7, табл. 1) с эпицентром на юго-восточном шельфе острова, вызвавшем колебания в 3-4 балла в пос. Макаров.

Из 988 землетрясений, определенных по оперативным данным на территории Курило-Охотского региона, 62 события вызвали ощутимые колебания в населенных пунктах островов (рис. 6 и 7).

Среди наиболее сильных событий по энергетическому критерию можно выделить следующие землетрясения:

21 февраля в 12:22 UTC (M = 5.6; $M_W = 5.6$; H = 54 км; № 9 на рис. 6, табл. 1; № 6 на рис. 8), в южной части о. Хоккайдо в очаговой зоне более сильного события 5 сентября 2018 г. с M = 7.2 [Сафонов и др., 2019]. Полученный механизм очага события 2019 г. можно охарактеризовать как сбросо-сдвиг в условиях меридионального растяжения. В населенных пунктах Сахалинской области это землетрясение не ощущалось;

2 марта в 03:22 UTC (*M* = 6.0; *M*_w = 6.0; *H* = 50 км; № 10 на рис. 6 и 7, табл. 1; № 8



Рис. 6. Эпицентры землетрясений Курило-Охотского региона по данным оперативного каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2019 г. Энергетические характеристики приведены к магнитуде по поверхностной волне $M_{_{\rm LH}}$. Номера эпицентров согласно табл. 1.

Figure 6. The earthquakes epicenters of the Kuril-Okhotsk region by the data of the SB FRC UGS RAS operative catalog in 2019. The energy characteristics are brought to the surface wave magnitude $M_{\rm LH}$. Epicenters' numbers are in accordance with the table 1.

на рис. 8), на южной границе зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН восточнее о. Хоккайдо под внешним склоном глубоководного желоба. Согласно определенному механизму очага землетрясение стало следствием сбросо-сдвига в испытывающей изгиб Тихоокеанской литосферной плите на границе с Охотоморской литосферной плитой. Колебания интенсивностью до 3–4 баллов зарегистрированы в пос. Южно-Курильск;

26 мая в 22:10 UTC (M = 5.8; H = 70 км; № 11 на рис. 6 и 7, табл. 1), восточнее о. Парамушир. Вызвало колебания в 4 балла в г. Северо-Курильск;

12 июня в 00:54 UTC (M = 5.8; H = 97 км; № 12 на рис. 6 и 7, табл. 1), также в районе северных Курильских островов. Ощущалось с интенсивностью в 2 балла в г. Северо-Курильск.

20 ноября в 08:26 UTC (*M*_w = 6.2; *H* = 525 км; № 13 на рис. 6, табл. 1; № 41 на рис. 8), является наиболее сильным в 2019 г., произошло на большой глубине западнее п-ова Камчатка в очаговой области Охотоморского землетрясения 2013 г. [Чебров и др., 2013]. Механизм очага землетрясения относительно поверхности можно охарактеризовать как сдвиговый со значительной сбросовой компонентой. На Курильских островах это событие не ощущалось;

5 декабря в 12:38 UTC (M = 5.9; H = 60 км; № 14 на рис. 6 и 7, табл. 1) – еще одно сильное событие в районе северных Курильских островов. Вызвало колебания интенсивностью в 4 балла в г. Северо-Курильск.

Также можно отметить интересную серию землетрясений, произошедших в районе глубоководного желоба юго-восточнее о. Кунашир с 3 по 10 декабря. Началом серии послужило событие 3 декабря в 23:25 UTC (M = 5.5; $M_W = 5.3$; H = 11 км; № 15 на рис. 6 и 7, табл. 1; № 46 на рис. 8) с механизмом



Рис. 7. Карта эпицентров ощутимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2019 г. по данным оперативного каталога. Энергетические характеристики приведены к магнитуде по поверхностной волне $M_{\rm LH}$; *I* – интенсивность сотрясений, балл; 1 – сейсмическая станция; 2 – граница региона. Номера эпицентров согласно табл. 1.

Figure 7. Appreciable earthquakes' epicenters map in the SB FRC UGS RAS responsibility zone by the data of the operative catalog in 2019. Energy characteristics are brought to the surface wave magnitude $M_{\rm LH}$; I – intensity of shaking; 1 – seismic station; 2 – region borders. Epicenters' numbers are in accordance with the table 1.

очага, квалифицируемым как взброс в условиях сжатия, перпендикулярного оси желоба, ощущавшееся в пос. Малокурильское с интенсивностью в 3–4 балла. В течение следующей недели примерно в том же районе зарегистрировано еще 7 событий магнитудного диапазона M = 4.5-4.7 и свыше десятка более слабых землетрясений, на островах эти события не ощущались.

Среди наиболее сильно ощущавшихся выделяются другие землетрясения:

18 сентября в 02:54 UTC (M=4.3; $K_{\rm C}$ =13.0; H = 55 км; № 16 на рис. 6 и 7, табл. 1). Вызвало сотрясения в 4–5 баллов в пос. Горный и Горячие Ключи на о. Итуруп. Значительная интенсивность макросейсмических проявлений необычна для столь слабой магнитуды на большом расстоянии населенных пунктов от гипоцентра. Возможно, магнитуда события требует переоценки, для сравнения приведено значение энергетического класса по С.Л. Соловьеву, примерно соответствующее магнитудному значению M = 5.9;

23 ноября в 12:58 UTC ($M = 4.6; M_w = 5.1;$ H = 68 км; № 17 на рис. 6 и 7, табл. 1; № 44 на рис. 8). Наиболее сильные колебания интенсивностью в 5 баллов вызвало в пос. Малокурильское на о. Шикотан.

На рис. 7 показаны все землетрясения зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН, ощущавшиеся жителями (в пределах Российской Федерации). Как и следовало ожидать, в основном это достаточно сильные землетрясения, произошедшие на небольшой глубине в населенных районах главным образом на севере и юге Курильских островов.

Механизмы очагов землетрясений

Ежегодно составляется каталог механизмов очагов землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН, включающий несколько десятков, как правило, наиболее сильных событий регионов. С недавнего времени Сахалинский филиал в сотрудничестве с ИМГиГ ДВО РАН начал массовое определение тензора сейсмического момента очага землетрясения как более полной характеристики параметров очага, чем классический механизм в двухдипольном приближении. Расчет тензора сейсмического момента осуществляется с использованием программного комплекса ISOLA [Sokos, Zahradník, 2013; Сафонов, Коновалов, 2014]. Для инверсии волновых форм использовались записи широкополосных велосиграфов, установленных на стационарных пунктах наблюдения СФ ФИЦ ЕГС РАН (рис. 1). Дополнительно привлекались записи сейсмических станций КФ ФИЦ ЕГС РАН, а также широкополосных станций сети F-net агентства NIED, Япония [NIED].

Всего в 2019 г. удалось получить решения тензора сейсмического момента очага для 55 землетрясений, включая 1 в регионе Приамурье и Приморье, 1 в Сахалинском регионе и 53 в Курило-Охотском регионе (рис. 7). Большинство землетрясений с определенными механизмами очага произошли в районе о. Хоккайдо, южных и центральных Курильских островов, что связано с достаточной плотностью сети широкополосных сейсмических станций (главным образом сети F-net на Хоккайдо) и общим высоким уровнем сейсмичности этого района.

На рис. 8 показаны тензоры сейсмического момента очагов в двухдипольном приближении (в проекции на нижнюю полусферу).

По данным о механизмах очагов за один год нельзя делать выводов о закономерностях сейсмотектоники региона, однако можно отметить, что характеристики землетрясений 2019 г. в основном укладываются в сложившиеся к настоящему времени представления о процессах, происходящих в зоне субдукции Тихоокеанской плиты под окраинные моря (Балакина, 1995; Astiz et al., 1988; Злобин и др., 2011; Christova, 2015; Сафонов, 2019; и др.). Выделяются характерные сбросы в зоне задугового изгиба плиты, в 2019 г. представленные событием № 8 на рис. 8; поддвиги в зоне контакта литосферных плит (№ 3, 4, 5, 9, 12, 23, 25); многочисленные взрезы зоны промежуточных глубин, где предполагается ее обратный изгиб (№ 15, 29, 32, 53, 54). Однако для интерпретации многих механизмов очагов произошедших в 2019 г. землетрясений поверхностного подхода с применением общей модели субдукционного процесса



Рис. 8. Механизмы очагов землетрясений Курило-Охотского региона в 2019 г. по данным СФ ФИЦ ЕГС РАН. **Figure 8.** Earthquakes focal mechanisms of the Kuril-Okhotsk region in 2019 by the data of the SB FRC UGS RAS.

может оказаться недостаточно. Необходимо конкретное рассмотрение особенностей тектоники каждого района и сопоставление с исторической сейсмичностью и механизмами очагов, что находится за рамками целей данной работы.

Сейсмическая активность и график Беньофа

В целях сравнения сейсмичности зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2019 г. с наблюдениями предыдущих лет для Курило-Охотского региона был построен график накопления условной деформации по Беньофу [Benioff, 1951]:

$$e = \frac{\sum \sqrt{E}}{T}$$

Как видно из рис. 9 a, b, в последнее десятилетие скорость накопления условной деформации в регионе была относительно стабильной, несколько выделяются наличием крупных сейсмических событий 2009, 2013, 2018 гг. Наклон графика в 2019 г. остается приблизительно постоянным, сравнимым с периодами 2010, 2014 и 2017 гг. Это говорит о том, что вся сейсмичность региона в 2019 г. относится к фоновой, не отмечено ни усиления, ни ослабления, что могло бы быть признаком изменения сейсмического режима в ожидании крупного регионального землетрясения. На рис. 9 b показаны некоторые описанные выше крупные землетрясения 2019 г., создавшие заметную ступень на графике Беньофа. В пределах всего региона их влияние на наклон графика незначительно.

На рис. 10 показан график повторяемости землетрясений Курило-Охотского региона, построенный для интервала 2009–2019, для сравнения на графике показаны значения магнитудных интервалов по данным 2018 и 2019 гг. Можно отметить некоторый дефицит сильных (M = 5.5-6.0) событий в 2019 г.

Пространственное распределение сейсмичности части территории Курило-Охотского региона в 2019 г. (рис. 11 а) и для десятилетнего интервала 2009–2018 гг. (рис. 11 b) отражено на картах сейсмической активности для энергетического уровня A_{10} ,



Рис. 9. График Беньофа для Курило-Охотского региона по данным каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2009–2019 гг. (а) и оперативного каталога за 2019 г. (b).

Figure 9. Benioff diagrams for the Kuril-Okhotsk region by the data of the SB FRC UGS RAS catalogs for 2009–2019 (a) and the operative catalog for 2019 (b).

построенных методом суммирования с постоянной детальностью [Ризниченко, 1964]. Подобный метод удобен для представления сейсмичности регионов с неравномерным охватом территории сетями наблюдений. Помимо этого данная методика расчета слабее зависит от погрешностей определения магнитуды сильных землетрясений, чем методики расчета карт, основанных на сейсмической энергии или сейсмическом моменте, что с учетом значительных проблем Сахалинского филиала в точности определения магнитуд особенно важно. Детали построения описаны в [Сафонов и др., 2019].

В 2019 г., как и на протяжении всего периода сейсмических наблюдений, наиболее сейсмически активной остается зона контакта Тихоокеанской и Охотоморской литосфер-*Lg N*



Рис. 10. График повторяемости землетрясений Курило-Охотского региона в 2009–2019 гг.

Figure 10. Gutenberg-Richter diagram of earthquakes repeatability in the Kuril-Okhotsk region in 2009–2019.

ных плит, находящаяся между глубоководным желобом и островной дугой (см. рис. 11 а). Области за- и преддуговой внутриплитовой сейсмичности, а также области погруженной Тихоокеанской плиты под Охотским морем существенно менее сейсмически активны. Впрочем, про глубокие области нельзя говорить с полной уверенностью, так как представительность каталога оценивалась вдоль поверхности и без учета глубины. Так, район сильных глубоких землетрясений к западу от п-ова Камчатка, судя по магнитуде происходящих здесь в последние годы событий, должен, по крайней мере, не уступать по активности наиболее сейсмичным областям Курильской дуги.

Из сравнения показателей коэффициента A_{10} в 2019 г. и в десятилетний период 2009–2018 можно сделать вывод, что в 2019 г. сейсмическая активность в районе северных и южных Курильских островов близка к среднему многолетнему уровню ($A_{10} = 1-2$). На средних Курилах сейсмическая активность в 4–10 раз ниже. Кроме того, напротив прол. Крузенштерна наблюдается область нулевых значений сейсмической активности, что отчасти связано с низкой представительной магнитудой каталога для этого района (M_{min} =4.5), так как эпицентры землетрясений ниже расчетного представительного уровня (рис. 5) здесь отмечены.

Согласно принятым критериям, сейсмическая активность в диапазоне 0.1–1 считается умеренной, выше 1 – высокой [Сейсмическое районирование..., 1978]. Таким образом, сейсмическую активность северных и южных Курил в 2019 г. можно считать высокой, что является обычным для данного региона, сейсмическая активность средних Курильских островов характеризуется как умеренная, местами как низкая.



Рис. 11. Сейсмическая активность Курило-Охотского региона по данным каталога землетрясений СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2019 г. (а) и за 2009–2018 гг. (b). Изолинии оконтуривают области, где ежегодное количество землетрясений энергетического класса $K_c = 10$ из расчета на 1000 км² равно либо превышает указанное значение. Пунктиром показан глубоководный желоб и контур Курильской котловины.

Figure 11. Seismic activity of the Kuril-Okhotsk region by the data of the earthquakes catalog of the SB FRC UGS RAS for 2019 (a) and for 2009–2018 (b). Isolines delineate the areas, where the annual number of earthquakes of the energy class $K_c = 10$ per 1000 km² is equal to or exceeds the specified value. The deep-sea trench and the Kuril basin contour are shown with a dotted line.

Заключение

В сейсмическом отношении 2019 год для территории зоны ответственности Сахалинского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» выдался одним из наиболее спокойных за последнее десятилетие: отсутствовали сейсмические события магнитудой более M = 6.2. Все землетрясения, произо-

шедшие в пределах соответствующих районов, можно отнести к фоновым событиям.

В Приамурье и Приморье количество и энергия землетрясений, как коровых, так и глубокофокусных, оказались ниже средних годовых значений за 2009–2018 гг. Ощутимых событий в 2019 г. не было отмечено вообще, что для относительно слабосейсмичного региона не является исключительным явлением.

В Сахалинском регионе произошло несколько представляющих интерес для изучения коровых событий с магнитудой M = 4.6-4.9 на шельфе острова, однако опасных колебаний они не вызвали. Общий уровень сейсмичности, исходя из количества и энергии произошедших землетрясений, можно охарактеризовать как умеренный.

В Курило-Охотском регионе продолжилась активизация в очагах сильных событий предыдущих лет: землетрясения на о. Хоккайдо с M = 7.2в 2018 г. и глубокофокусного Охотоморского землетрясения 2013 г. M = 8.3к западу от п-ова Камчатка. Однако новых сильных (M > 6.5) землетрясений в 2019 г. не отмечено. Сейсмическую активность северных и южных Курильских островов можно считать высокой на уровне средних многолетних значений. На средних Курильских островах сейсмическая активность умеренная, пониженная. Следует обратить внимание на район прол. Крузенштерна, где наметилось сейсмическое затишье с магнитуды представительности каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН ($M_{\min} = 4.5$).

Список литературы

1. Балакина Л.М. **1995.** Курило-Камчатская сейсмогенная зона – строение и порядок генерации землетрясений. *Физика Земли*, 12: 48–57.

2. Габсатарова И.П. **2007**. Границы сейсмоактивных регионов с 2004 г. В кн.: Землетрясения России в 2004 году. Обнинск: ГС РАН, с. 139.

3. ГОСТ 34511-2018. **2019.** Землетрясения. Макросейсмическая шкала интенсивности: Введ. 20.12.2018. М.: Стандартинформ, 27 с.

4. Злобин Т.К., Сафонов Д.А., Полец А.Ю. **2011.** Распределение землетрясений по типам очаговых подвижек в Курило-Охотском регионе. *Докл. АН*, 440(4): 527–529.

5. Коваленко Н.С., Фокина Т.А., Сафонов Д.А. **2019.** Приамурье и Приморье. Землетрясения Северной Евразии, 22 (2013 г.): 161–172. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. doi:10.35540/1818-6254.2019.22.14

6. Ризниченко Ю.В. **1964.** Метод суммирования землетрясений для изучения сейсмической активности. *Изв. АН СССР. Сер. геофизическая*, 7: 969–977.

7. Сафонов Д.А. **2019.** Пространственное распределение тектонических напряжений в южной глубокой части Курило-Камчатской зоны субдукции. *Геосистемы переходных зон*, 3(2): 175–188. doi:10.30730/2541-8912.2019.3.2.175-188

8. Сафонов Д.А., Коновалов А.В. **2017.** Использование программы ISOLA для определения тензора сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов. *Тихоокеанская геология*, 36(3): 102–112.

9. Сафонов Д.А., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. **2019.** Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2018 году. *Геосистемы переходных зон*, 3(4): 364–376. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.364-376

10. Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. **1980.** Отв. ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшков. М.: Наука, 308 с.

11. Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. **1967.** Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений. *Физика земли*, 2: 13–22.

12. Фокина Т.А., Коваленко Н.С., Костылев Д.В., Левин Ю.Н., Лихачева О.Н., Михайлов В.И. **2018.** Приамурье и Приморье, Сахалин и Курило-Охотский регион. В кн.: Землетрясения России в 2016 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, с. 45–53.

13. Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Михайлов В.И. **2019.** Сахалин. Землетрясения Северной Евразии, 22 (2013). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 173–183. doi:10.35540/1818-6254.2019.22.15

14. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А., Кравченко Н.М., Матвеенко Е.А., Митюшкина С.В., Раевская А.А., Салтыков В.А., Чебров Д.В., Ландер А.В. **2013.** Глубокое Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. с магнитудой Мw = 8.3 – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(21): 17–24.

15. Шулаков Д.Ю., Мурыськин А.С. **2019.** Спектральный подход к оценке регистрационных возможностей системы сейсмомониторинга Уральского региона. В кн.: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XIV Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, с. 111.

16. Astiz L., Lay T., Kanamori H. **1988.** Large intermediate-depth earthquakes and the subduction process. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 53(1–2): 80–166. https://doi.org/10.1016/0031-9201(88)90138-0

17. Benioff H. **1951**. Earthquakes and rock creep. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 41(1): 31–62.

18. Christova C.V. **2015.** Spatial distribution of the contemporary stress field in the Kurile Wadati-Benioff zone by inversion of earthquake focal mechanisms. *J. of Geodynamics*, 83: 1–17.

https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.11.001

19. NIED – National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan. URL: http://www.fnet.bosai.go.jp (accessed 27.02.2020).

20. Sokos E., Zahradník J. **2013.** Evaluating centroid moment tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*, 84: 656–665. https://doi.org/10.1785/0220130002

Об авторах

САФОНОВ Дмитрий Александрович (ORCID 0000-0002-2201-2016), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, КОСТЫЛЕВ Дмитрий Викторович (ORCID 0000-0002-8150-9575), начальник отдела сейсмических стационаров, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, младший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, ФОКИНА Татьяна Александровна, начальник отдела сводной обработки сейсмологических данных, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, КОВАЛЕНКО Наталья Семеновна, ведущий инженер отдела сводной обработки сейсмологических данных, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск.

References

 Astiz L., Lay T., Kanamori H. **1988.** Large intermediate-depth earthquakes and the subduction process. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 53(1–2): 80–166. https://doi.org/10.1016/0031-9201(88)90138-0
Balakina L.M. **1995.** Kurilo-Kamchatskaia seismogennaia zona – stroenie i poriadok generatsii

zemletriasenii [Kuril-Kamchatka seismogenic zone – the structure and generation order of earthquakes]. *Fizika Zemli = Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 12: 48–57. (In Russ.).

3. Benioff H. **1951**. Earthquakes and rock creep. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 41(1): 31–62.

4. Chebrov V.N., Kugaenko Yu.A., Vikulina S.A., Kravchenko N.M., Matveenko E.A., Mitiushkina S.V., Raevskaya A.A., Saltykov V.A., Chebrov D.V., Lander A.V. **2013**. [Deep earthquake in the Sea of Okhotsk 24.05.2013 with a magnitude Mw=8.3 – the strongest seismic event near Kamchatka coastline for the period of detailed seismological observations]. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences*, 1(21): 17–24. (In Russ.).

5. Christova C.V. **2015.** Spatial distribution of the contemporary stress field in the Kurile Wadati-Benioff zone by inversion of earthquake focal mechanisms. *J. of Geodynamics*, 83: 1–17. https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.11.001

6. Fokina T.A., Kovalenko N.S., Kostylev D.V., Levin Yu.N., Likhacheva O.N., Mikhailov V.I. **2018**. Priamurye and Primorye, Sakhalin and Kuril-Okhotsk region. In.: *Zemletriaseniia Rossii v 2016 godu = Earthquakes in Russia, 2016*. Obninsk: FITs EGS RAN [FRC UGS of RAS], p. 45–53. (In Russ.).

7. Fokina T.A., Safonov D.A., Kostylev D.V., Mikhailov V.I. **2019**. Sakhalin. Zemletriaseniia Severnoi Evrazii = Earthquakes in Northern Eurasia, 22 (2013). Obninsk: FITs EGS RAN [FRC UGS of RAS], 173–183. (In Russ.). doi:10.35540/1818-6254.2019.22.15

8. Gabsatarova I.P. **2007**. Granitsy seismoaktivnykh regionov s 2004 g. [The boundaries of seismically active regions since 2004 yr.]. In.: *Zemletriaseniia Rossii v 2004 godu* [Earthquakes in Russia, 2004]. Obninsk: GS RAN [Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences], p. 139. (In Russ.).

9. GOST 34511-2018. **2019**. Zemletriaseniia. Makroseismicheskaia shkala intensivnosti: Vved. 20.12.2018 [Earthquakes. Macroseismic intensity scale: Introduction 20.12.2018]. Moscow: Standartinform, 27 p. (In Russ.).

10. Kovalenko N.S., Fokina T.A., Safonov D.A. **2019**. Priamurye and Primorye. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii = Earthquakes in Northern Eurasia*, 22 (2013 g.): 161–172. Obninsk: FITs EGS RAN [FRC UGS of RAS]. (In Russ.). doi:10.35540/1818-6254.2019.22.14

11. NIED – National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan.

URL: http://www.fnet.bosai.go.jp (accessed 27.02.2020).

12. Riznichenko Yu.V. **1964**. Metod summirovaniia zemletriasenii dlia izucheniia seismicheskoi aktivnosti [The method of earthquakes summation for the study of seismic activity]. *Izv. AN SSSR. Ser. geofizicheskaia*, 7: 969–977. (In Russ.).

13. Safonov D.A. **2019**. Spatial distribution of tectonic stress in the southern deep part of the Kuril-Kamchatka subduction zone. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(2): 175–188. (In Russ.). doi:10.30730/2541-8912.2019.3.2.175-188

14. Safonov D.A., Konovalov A.V. **2017**. Moment tensor inversion in the Kuril-Okhotsk and Sakhalin Regions using ISOLA software. *Tikhookeanskaia geologiia = Geology of the Pacific Ocean*, 36(3): 102–112. (In Russ.).

15. Safonov D.A., Fokina T.A., Kovalenko N.S. **2019**. Seismicity of the South Far East of Russia in 2018. *Geosistemy perekhodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 364–376. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.364-376

16. Seismicheskoe raionirovanie territorii SSSR. Metodicheskie osnovy i regional'noe opisanie karty 1978 g. [Seismic zonation of the USSR territories. Methodical basis and regional description of the map of 1978]. **1980**. Eds V.I. Bune, G.P. Gorshkov. Moscow: Nauka, 308 p. (In Russ.).

17. Shulakov D.Yu., Murys'kin A.S. **2019**. Spektral'nyi podkhod k otsenke registratsionnykh vozmozhnostei sistemy seismomonitoringa Ural'skogo regiona [Spectral approach to the assessment of recording abilities of the system of seismic monitoring of Ural region]. In.: Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh: Materialy XIV Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly [Modern methods of seismological data processing and interpretation: Proceedings of the XIV International seismological school]. Obninsk: FITS EGS RAN [Federal Research Center of the United Geophysical Survey of RAS], p. 111. (In Russ.).

18. Sokos E., Zahradník J. **2013.** Evaluating centroid moment tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*, 84: 656–665. https://doi.org/10.1785/0220130002

19. Solov'ev S.L., Solov'eva O.N. **1967**. Sootnoshenie mezhdu energeticheskim klassom i magnitudoi Kuril'skikh zemletriasenii [Relation between energy class and magnitude of Kuril earthquakes]. *Fizika zemli = Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2: 13–22. (In Russ.).

20. Zlobin T.K., Safonov D.A., Polets A.Yu. **2011**. Distribution of earthquakes by the types of the source motions in the Kuril-Okhotsk region. *Doklady Earth Sciences*, 440(2): 1410–1412. doi:10.1134/S1028334X11100096

УДК 550.343(571.642)

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.160-168.169-177

Среднесрочные оценки сейсмической опасности на о. Сахалин методом LURR: новые результаты

© 2020 А. С. Закупин*, Н. В. Богинская

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

Резюме. Проведен ретроспективный анализ сейсмического режима центральной части о. Сахалин в период 1997–2005 гг. методом LURR (load/unload response ratio). Расчеты для этой части острова за указанный период ранее не проводились ввиду недостаточности данных в расчетной выборке событий. В данной работе привлечена дополнительная информация из двух независимых каталогов. Проанализирован методом LURR характер сейсмичности перед Углегорским землетрясением 4 августа 2000 г. (Mw = 6.7), которое до сих пор значилось как пропущенная цель в серии из 7 прогнозных оценок сахалинских землетрясений с магнитудой выше 5.5. Результаты расчетов выявили предвестник – аномалию параметра LURR, на основании которого точно определено место и время условно (ретроспективно) прогнозируемого события. Аномалия параметра LURR зафиксирована в расчетной области в феврале 2000 г., за 6 мес. до землетрясения.

Ключевые слова: сейсмичность, сейсмические события, метод LURR, предвестник землетрясения, ретроспективный анализ.

Для цитирования: Закупин А.С., Богинская Н.В. Среднесрочные оценки сейсмической опасности на о. Сахалин методом LURR: новые результаты. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 2, с. 160–168. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.160-168.169-177

Mid-term assessments of seismic hazards on Sakhalin Island using the LURR method: new results

Aleksander S. Zakupin*, Nataliya V. Boginskaya

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

Abstract. A retrospective analysis of seismic regime in the central part of Sakhalin Island within the period from 1997 to 2005 by the LURR (load/unload response ratio) method is presented. Estimates were not earlier conducted for the outlined period due to a lack of data in the rated sampling of this part of the island. In the present work, additional information from two independent catalogues is adduced. Seismicity behaviour prior to the Uglegorsk earthquake of 4 August 2000 (Mw = 6.7) was considered according to the LURR method. This earthquake was up till now considered as a missed target in the series of 7 predictive assessments of Sakhalin earthquakes having a magnitude above 5.5. The computation results revealed the LURR parameter anomaly to be a precursor, on which basis the location and time of the conditionally predictable event were accurately determined. The LURR parameter anomaly was noted in the rated area in the February of 2000, 6 months prior to the earthquake's occurrence.

Keywords: seismicity, seismic events, LURR method, earthquake precursor, retrospective analysis.

For citation: Zakupin A.S., Boginskaya N.V. Mid-term assessments of seismic hazards on Sakhalin Island using the LURR method: new results. *Geosistemy perekhodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 169–177. (In Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.160-168.169-177

Введение

В последние несколько лет на Сахалине сотрудниками Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) в области среднесрочных оценок сейсмической опасности для землетрясений с Mw > 5.5 получен ряд интересных результатов. Методом LURR [Yin et al., 2000; Yangde et al., 2012] за период с 1988 по 2019 г. в 6 районах острова были выявлены аномалии в распределениях расчетного параметра (значение отклоняется от базового, равного единице), т.е. предвестники землетрясений [Закупин и др., 2018; Закупин, Семенова, 2018].

Метод LURR в первоисточнике [Yin X., Yin C., 1991; Yin et al., 2000] связывает появление аномалии с подготовкой в расчетной зоне землетрясения с магнитудой выше верхней границы расчетной выборки. При этом нижняя граница расчетной выборки устанавливается произвольно для отсечения слабой – фоновой сейсмичности. Верхняя же граница показывает минимальную магнитуду ожидаемого землетрясения (главного толчка). Оба этих порога подбираются с учетом характера региональной сейсмичности. Нами экспериментально установлено, что приемлемым вариантом при расчетах для Сахалина нижняя граница может быть выбрана M = 3.3, а верхняя – 5.0. При этом выявленные аномалии хорошо согласуются с землетрясениями, у которых M > 5.5. Исследователи [Yin et al., 2000; Yangde et al., 2012] отмечают, что период тревоги с момента обнаружения аномалии может составлять от 2 до нескольких лет, а землетрясение должно произойти в расчетной области (линейный размер 100 км).

На Сахалине во всех шести районах в течение не более 2 лет после возникновения аномалий в выявленных зонах произошли сильные сейсмические события. В 4 случаях аномалии были определены постфактум для уже случившихся землетрясений (в ретроспективе), а 2 из 6 зон выявлены в режиме оперативных расчетов (такие проводятся с 2015 г.). Это позволило сделать два официальных прогноза: Онорского (2016 г., Mw = 5.8) и Крильонского (2017 г., Mw = 5.0) землетрясений [Закупин и др., 2018; Закупин, Семенова, 2018]. Прогнозы рассматривались на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям. Оба прогноза признаны полностью реализованными, хотя имелись небольшие отклонения по месту очага для Онорского землетрясения (на краю расчетной зоны) [Закупин и др., 2018] и по магнитуде для Крильонского (Mw = 5.0). Землетрясений с Mw > 5.5 на острове, согласно данным из 3 использованных для расчетов сейсмических каталогов [Закупин и др., 2018], за последние 30 лет было 7: Нефтегорское (1995 г., Mw = 7.2), Углегорское (2000 г., Mw = 6.7), Пильтунское (2005 г., Mw = 5.6), Горнозаводское (2006 г., Mw = 5.6), Невельское (2007 г., Mw = 6.2), Уангское (2010 г., Mw = 5.7) и Онорское (2016 г., Mw = 5.8).

В расчетах для северной части острова преимущественно с 50.0° по 54.0° с.ш. с 2006 по 2016 г. применялся каталог сети станций ИМГиГ ДВО РАН [Stepnov et al., 2014]. Этот каталог формировался и поддерживался лабораторией физики землетрясений ИМГиГ ДВО РАН на основе данных 6 станций (одна из них, в г. Оха, принадлежала Сахалинскому филиалу Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН)). Несмотря на то что СФ ФИЦ ЕГС РАН по территории, которую покрывала сеть ИМГиГ ДВО РАН, тоже формировал сейсмический каталог, для расчетов ранее мы использовали каталог ИМГиГ ДВО РАН по причине его большей доступности и оперативности наполнения. С его помощью были выявлены две зоны с аномалиями в 2008 и 2015 гг. Отметим, что аномалия 2008 г. [Закупин и др., 2018] была довольно слабая – параметр незначительно превысил значение 2. Аномалия предваряла Уангское землетрясение в марте 2010 г., и зона с аномалией почти совпала с эпицентром землетрясения. Вторая аномалия была значительной (превышение порога в пять раз), но центр расчетной зоны оказался смещен по отношению к эпицентру реализованного прогноза – Онорского землетрясения – на 1° в северном направлении и на 0.5° в восточном.

Для ретроспективных расчетов на период с 1988 по 2005 г. применялся каталог землетрясений о. Сахалин за 1905–2005 гг. [Поплавская и др., 2006]. По данным этого каталога, в 1988–2005 гг. сейсмических событий в диапазоне рабочей выборки $3.3 \le M \le 5.0$ во всех частях острова было недостаточно для проведения статистически значимых расчетов, что весьма снижало степень доверия получаемым результатам. Однако, поскольку на севере острова было отмечено самое сильное сейсмическое событие на Сахалине – Нефтегорское землетрясение 1995 г. (Мw = 7.2), для северной части острова были выполнены расчеты с помощью данного (за неимением иного для того периода) каталога.

Анализ данных на территории севернее 51.0° с.ш. выявил две зоны сейсмической опасности в 1993 и 2004 г., расположенные недалеко друг от друга, – зоны Нефтегорского и Пильтунского землетрясений. Несмотря на имевшиеся опасения, дефицит расчетных событий не привел к выявлению ложных признаков [Закупин и др., 2018].

Для расчетов по южной части острова с 2003 по 2019 г. использовался каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН. Эти данные позволили выявить предвестник Невельского землетрясения в мае 2007 г. [Закупин и др., 2018], а также сделать оперативный прогноз землетрясения в районе п-ова Крильон после обнаружения аномалии в 2016 г. [Закупин, Семенова, 2018]. Оба землетрясения произошли в указанных зонах, но Крильонское в апреле 2017 г. имело магнитуду 5.0, что ниже установленного нами порога ожидания – 5.5. Ввиду условности данного порога (определение магнитуды по границам выборки) прогноз значится как реализованный.

В целом статистика по Сахалину оказалась впечатляющей, ведь всего перед двумя сильными землетрясениями из 8 (включая Крильонское) не были зафиксированы методом LURR аномалии – перед Углегорским (04.08.2000, Mw = 6.7) и Горнозаводским (17.08.2006, Mw = 5.6). Причины в обоих случаях разные. По Горнозаводскому расчеты были проведены, но не выявлен предвестник, а по Углегорскому расчеты для того периода и той зоны (49-51° с.ш.) не проводились на том основании, что данных в каталоге [Поплавская и др., 2006] для этого недостаточно. Однако предвестник Нефтегорского землетрясения был получен именно по этому каталогу, который захватывает необходимый для расчета период, а магнитуда Углегорского землетрясения Mw = 6.7 немногим меньше магнитуды Нефтегорского (Мw = 7.2). Его «игнорирование», скорее, обусловлено

отсутствием жертв (зафиксированы только повреждения конструкций). Но в статистике расчетов по Сахалину этот пробел, конечно, желательно заполнить, с привлечением максимально возможного объема сейсмологической информации. Для этой цели использован каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН, который формируется начиная с 1997 г. и постоянно пополняется, охватывая весь Сахалин. Благодаря этому результат обработки по региональному каталогу [Поплавская и др., 2006] можно сопоставить с результатом по данному каталогу для принятия экспертного решения об аномалиях.

Цель данной работы – проведя методом LURR расчеты по выявлению предвестников в зоне Углегорского землетрясения, показать успешный результат по используемой методике, или, в противном случае, подтвердить нынешний статус этого землетрясения – пропущенная цель.

Методика

Metoд LURR был разработан китайскими сейсмологами в 1990-х годах [Yin X., Yin C., 1991; Yin et al., 1995]. Его название можно перевести с английского как «отношение отклика среды на нагрузку/разгрузку». Коротко и в упрощенном виде суть метода состоит в следующем [Закупин и др., 2018; Закупин и др., 2020]. Метод опирается на непротиворечивые модели теории упругости (модель абсолютно жесткой Земли) и механики разрушения (критерий Кулона-Мора). Основной посыл состоит в том, что за пределами упругого деформирования среды реакция на нагрузку не соответствует реакции на разгрузку. Со временем это несоответствие только усиливается – вплоть до потери устойчивости разрушающегося объекта. Метод предполагает решение уравнений теории упругости для определения компонент тензора напряжений на площадке, где расположен слип-вектор. Расчеты выполняются для каждого землетрясения в каталоге. При этом учитываются смещения от приливного воздействия в заданной точке. Использование в методе лунно-солнечных приливов оправдано тем, что другого такого идеального откалиброванного индикатора нагрузки/разгрузки в геосреде найти невозможно. Тектоническая и литостатическая компоненты не учитываются, так как скорости их изменения на порядки отличаются от приливных. Для разделения землетрясений на «нагрузочные» и «разгрузочные» проводится расчет критерия Кулона-Мора. Если землетрясение произошло во время роста значения этого критерия, то оно определяется как «положительное», в противном случае как «отрицательное». Исследуемый параметр (LURR) отождествляется с отношением суммарной деформации Беньофа всех положительных землетрясений ко всем отрицательным за некоторый промежуток времени (в математической обработке это величина скользящего окна). В упругопластических средах перед разрушением наблюдается явление текучести, когда при неизменных напряжениях деформация продолжает расти. Очевидно, что при таком положении вещей расчет отношения отклика на нагрузку к отклику на разгрузку не имеет смысла (реакции как таковой нет), а математически параметр LURR снова становится близким к единице. В области перехода от упругого к неупругому деформированию этот параметр начнет расти и вблизи разрушения среды достигнет своих максимальных значений. Именно поэтому в среде, где реализуется хрупкое разрушение, можно ожидать главное (прогнозируемое) событие после выхода кривой на максимальные значения, а в среде, где возможно проявление пластических эффектов, возникает возврат параметра к фоновому уровню и некоторая задержка (временной лаг с момента определения прогнозного признака, аномалии – вариации LURR) по времени. Вероятно, что эта задержка зависит от геологических условий, однако понять эту связь пока не представилось возможным. Методика расчетов по методу LURR подробно излагается в оригинальных работах [Yin X., Yin C., 1991; Yin et al., 1995; Yin et al., 2000], а также в работах исследователей, использовавших метод [Закупин и др., 2018, 2020; Yangde et al., 2012; и др.].

Для расчетов по методу LURR мы применяли разработанный в ИМГиГ ДВО РАН программный комплекс Seis-ASZ с выбором стандартных для наших вычислений параметров: окно 360 дней, сдвиг 30 дней, диапазон магнитуд 3.3–5.0 [Закупин и др., 2018].

Исходные материалы

Расчеты методом LURR для центральной части острова, в том числе района, где произошло Углегорское землетрясение, проведены по двум каталогам: «Региональному каталогу землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.» [Поплавская и др., 2006] и каталогу СФ ФИЦ ЕГС РАН, представленному в печати ежегодными выпусками (например, [Фокина и др., 2019]). Для удобства будем называть их каталог № 1 и № 2.

Первый каталог охватывает период с 1905 по 2005 г. и содержит более 3500 сейсмических событий по о. Сахалин. Каталог № 2 за период инструментальных наблюдений с 1997 г. включает в себя землетрясения всех регионов Северной Евразии с параметрами: гипоцентр, магнитуда, механизм очага, а также макросейсмические данные. В обоих каталогах отражены сейсмические события с магнитудой M ≥ 3.0.

Для проведения исследований в данной работе была выбрана прямоугольная область с координатами от 48.0° до 50.0° с.ш. и от 141.0° до 143.0° в.д. Выборка землетрясений для расчетов по каждому каталогу сделана с 1997 (за три года до Углегорского землетрясения) по 2005 г.

На рис. 1 представлены карты, построенные по данным каталогов № 1 и № 2, с эпицентрами землетрясений, произошедших с 1997 по 2005 г. в исследуемой зоне. Выборка по первому каталогу составила 363 сейсмических события с $M \ge 3.0$, из них 188 в диапазоне магнитуд ($3.3 \le M \le 5.0$), необходимых для проведения расчетов методом LURR. Выборка по второму каталогу 566 землетрясений с $M \ge 3.0$, из них в диапазоне $3.3 \le M \le 5.0$ оказалось 320 событий.

На картах представлено пространственно-глубинное распределение эпицентров сейсмических событий. Сопоставление данных по каталогам показало явное различие в количестве событий, а также незначительные расхождения в координатах событий, произошедших за один и тот же период



Рис. 1. Распределение эпицентров землетрясений в расчетной области по данным каталогов № 1 (слева)

и № 2 (справа) за период с 1997 по 2005 г.

времени в одной и той же области. Подавляющее большинство землетрясений в целом располагается в интервале глубин 10–15 км, за исключением одного землетрясения с глубиной 610 км, которое присутствует в обоих каталогах. В интервале глубин от 3 до 10 км, по данным обоих каталогов, сейсмическая активность снижена.

Сравнение данных по двум каталогам указывает на ограниченность регионального каталога землетрясений о. Сахалин [Поплавская и др., 2006] не только в количественном отношении, что наглядно представлено на картах эпицентров, но и в оценках энергетических величин сейсмических событий, которые, вероятно, выполнены в различных магнитудных шкалах. В данной ситуации проверка расчета путем сравнения с результатами по выборке из второго каталога крайне важна. В дальнейшем использование данных каталога № 1 нежелательно.

Результаты

Графики параметра LURR, построенные по двум каталогам для одной и той же расчетной зоны, в целом идентичны, и, что самое главное – аномалия перед Углегорским землетрясением отмечена в одно и то же время на обоих графиках (рис. 2). Это важно также и в связи со значительными различиями данных каталогов по количеству землетрясений и положению эпицентров. В феврале 2000 г., за 6 мес. до землетрясения, наблюдается характерный рост параметра в несколько раз и затем достаточно быстрый спад.

На рис. 3 показан график параметра LURR для событий с 1997 по 2019 г. по каталогу № 2. Как видно из графика, за 22 года кроме аномалии перед Углегорским событием были отмечены еще три значимые вариации, которые также определены как аномалии параметра. Это вариации в апреле 2008,



Рис. 2. Параметр LURR в расчетной области с координатами 48.0–50.0° с.ш. и 141.0–143.0° в.д. в период с 1997 по 2005 г. по каталогам № 1 (а) и № 2 (b). На левом графике для примера линиями показаны моменты начала тревоги (аномалия) и ее завершения, стрелкой – время Углегорского землетрясения.

в ноябре 2014 и в феврале 2019 г. Последняя из них указывает на период тревоги минимум до февраля 2021 г., что можно оценить как оперативный прогноз. В настоящее время такие же оценки получены для территории южнее рассматриваемой в данной статье области, и тоже в районе Центрально-Сахалинского разлома [Закупин, Богинская, 2019]. В аномалиях 2008 и 2014 гг. несложно узнать аномалии перед Уангским и Онорским землетрясениями, рассчитанные ранее по каталогу ИМГиГ ДВО РАН [Закупин и др., 2018]. Наша расчетная зона (48.0-50.0° с.ш. и 141.0-143.0° в.д.) находится примерно на 200 км южнее эпицентра Уангского землетрясения, но при этом аномалия статистически значима, как и аномалия Онорского землетрясения, эпицентр которого в 4 раза



Рис. 3. График параметра LURR на период с 1997 по 2019 г. по данным каталога № 2 в расчетной области с координатами 48.0°–50.0° с.ш. и 141.0°–143.0° в.д.

ближе к расчетной зоне. Ранее по каталогу ИМГиГ ДВО РАН мы получили максимальный по уровню признак для Уангского землетрясения практически рядом с его эпицентром. Теперь же получили более отчетливое выражение признака на значительно большем расстоянии от эпицентра. Аномалия для Онорского землетрясения сопоставима с той, что выявлялась в предыдущих расчетах [Закупин и др., 2018], однако там расчетная зона была сильно удалена от эпицентра будущего землетрясения.

Для проверки по каталогу № 2 было проведено сканирование (перебор областейэллипсов) с 48.0° по 52.0° с.ш. Выявлено, что максимальных значений аномалии достигают в эллипсах, чьи центры близки к эпицентрам соответствующих землетрясений (рис. 4 a, b). Также отметим, что аномалия LURR перед Углегорским землетрясением незначительно усиливается в зоне-эллипсе, чей центр совпадает с эпицентром Онорского землетрясения (севернее самого Углегорского события на 1°), но полностью исчезает при дальнейшем смещении зоны на север, это можно увидеть в зоне с центром, совпадающим с эпицентром Уангского землетрясения. При этом в зоне влияния Уангского прогнозного признака (рис. 4 b) уровень аномалии перед Онорским событием практически не ослабевает. Фактически аномалия Углегорского землетрясения выявлена на территории, ограниченной координатами 48.0°-51.0° с.ш. и 141.0°-143.0° в.д.



Рис. 4. Расчеты параметра LURR по каталогу № 2 в областях, центры которых совпадают с эпицентрами Онорского (а) и Уангского (b) землетрясений.

Посмотрим, изменились ли прогнозные оценки по Уангскому и Онорскому землетрясениям после проведения альтернативных расчетов по каталогу № 2 по сравнению с каталогом ИМГиГ ДВО РАН. На рис. 5 а показана карта с расчетными областями, где были отмечены максимальные значения аномалий, для этих двух каталогов, а также эпицентры землетрясений. На карте видно, что лучшее согласование наблюдается для каталога № 2.

Для улучшения восприятия масштаб приведен к единому времени (с 2006 г.) и на рис. 5 b-е показаны аномалии LURR для обоих событий по двум каталогам. Время появления аномалий различается незначительно, а вот позиция зон в пространстве для каталога № 2 сближается с эпицентрами землетрясений. Также отметим, что в целом (а для Уангского землетрясения особенно) максимальные значения аномалий возрастают. Время появления аномалии по Уангскому землетрясению сдвинулось назад с октября до апреля 2008 г., а по Онорскому, напротив, продвинулось вперед с июля до ноября 2014 г. Незначительные колебания во времени появления аномалий не нарушили «сахалинской» статистики, и среднее время ожидания по всем сахалинским землетрясениям по-прежнему не превышает двух лет. Значительное улучшение качества оценок сейсмической опас-



Рис. 5. Карта с расчетными зонами (а), где отмечены аномалии LURR по каталогам ИМГиГ ДВО РАН и № 2 для Онорского (графики b и с соответственно) и Уангского (графики d и е соответственно) землетрясений.

ности для этих двух землетрясений по каталогу № 2, несомненно, может положительно характеризовать качество данных.

Таким образом, привлечение к расчетам новых данных (каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН) позволило не только установить ретроспективный предвестник Углегорского землетрясения (и вычеркнуть событие из списка пропущенных), но и улучшить результаты по близким (по времени и положению) событиям, которые были рассмотрены ранее.

Оценку эффективности метода LURR после новых результатов проведем по известной методике [Гусев, 1974]. Если по конкретному методу прогноз выдается для одной и той же пространственной области и одного и того же энергетического диапазона, то эффективность *J* можно определить по следующей формуле:

$$J = N_+ \cdot T / (N \cdot T_{alarm}),$$

где N_{+} – количество «ожидаемых» землетрясений, т.е. соответствующих успешному прогнозу, N – общее количество произошедших землетрясений с параметрами (местоположение и энергия), соответствующими прогнозу, T_{alarm} – общее время тревоги, т.е. суммарная длительность всех прогнозов, Т – общее время мониторинга сейсмической обстановки по рассматриваемому методу. Эффективность Ј показывает, во сколько раз количество спрогнозированных землетрясений превышает число попавших в общее время тревоги случайным образом. Очевидно, что при случайном угадывании эффективность Ј равна 1. Так вот, в нашем случае при N = 8 (если учитывать и Крильонское землетрясение с M = 5), успешных прогнозных оценок (включая ретроспективные) было $N_{+} = 7$. Общий период наблюдений составил 264 мес. (1995–2017 гг.), а время тревоги, суммированное по 7 случаям, - 93 мес. В итоге показатель Ј оказался равен 2.48 (против 2.28 до включения данных по Углегорскому землетрясению). Это значение превышает среднестатистические показатели по краткосрочным методам (в основном на базе аномалий геофизических полей) более чем в два раза [Чебров и др., 2013].

Заключение

Результаты расчетов параметра LURR по «Региональному каталогу землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.» и каталогу СФ ФИЦ ЕГС РАН указали на существование в центральной части Сахалина зоны с аномалией в феврале 2000 г., которая была предвестником для Углегорского землетрясения (август 2000 г.). Кроме того, показано, что «опасные зоны» в пространстве для Уангского и Онорского землетрясений (их эпицентры соседствуют с Углегорской расчетной зоной) определены по каталогу ИМГиГ ДВО РАН (период наполнения 2006–2016) с худшей точностью (отклонения до 1°), чем при использовании каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Успешный ретроспективный расчет параметра LURR перед Углегорским землетрясением можно добавить к общему количеству среднесрочных оценок сейсмической опасности на о. Сахалин этим методом. За последние тридцать лет таких прогностических оценок для землетрясений с магнитудой выше 5.5 (нижний предел, установленный авторами для Сахалина в методе LURR) сделано 6 (в том числе оперативный прогноз Онорского землетрясения в 2016 г.), притом что реальных событий, отвечающих этому условию, произошло 7. Еще один успешный прогноз методом LURR для Крильонского землетрясения (Mw = 5.0) в реальном времени был сделан в 2017 г., но он выбивается из общей статистики прогнозов землетрясений Сахалина тем, что магнитуда оказалась по факту меньше ожидаемого значения.

На сегодняшний день результаты, полученные методом LURR, на наш взгляд, не имеют аналогов среди других методов по степени эффективности получаемых оценок. Метод, несомненно, будет востребован для среднесрочных оценок сейсмической опасности на о. Сахалин в дальнейшем. Принципиально возможны детальные исследования в других сейсмоактивных регионах, тем более что отдельные успешные оценки уже имели место в нашей практике ранее (по сейсмическим данным Новой Зеландии [Закупин, Каменев, 2017] и Непала [Закупин, Жердева, 2017]).

Список литературы

1. Гусев А.А. 1974. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности. В кн.: Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 109–119.

2. Закупин А.С., Богинская Н.В. **2019.** Современная сейсмичность в районе Центрально-Сахалинского разлома (юг о. Сахалин): ложная тревога или отодвинутый прогноз? *Геосистемы переходных зон*, 3(1): 27–34. doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.027-034

3. Закупин А.С., Жердева О.А. **2017.** Ретроспективная оценка применимости методов среднесрочного прогнозирования землетрясений для северного Сахалина. *Вестник ДВО РАН*, 1: 18–25.

4. Закупин А.С., Каменев П.А. **2017.** О возможности пространственно-временной локализации повышенной сейсмической опасности в методике среднесрочного прогноза LURR (на примере Новой Зеландии). *Геосистемы переходных зон*, (3): 40–49.

5. Закупин А.С., Семенова Е.П. **2018.** Исследование процесса подготовки сильных землетрясений (Mw > 5) на Сахалине методом LURR. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 5: 83–98. https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98

6. Закупин А.С., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. **2018.** Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Онорского землетрясения на Сахалине (Mw = 5.8, 14 августа 2016 года). *Геология и геофизика*, 11: 1904–1911. https://doi.org/10.15372/gig20181112

7. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Богинская Н.В. **2020.** Применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине. *Геофизические процессы и биосфера*, 19(1): 66–78. https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4

8. Поплавская Л.Н., Иващенко А.И., Оскорбин Л.С., Нагорных Т.В., Пермикин Ю.Ю., Поплавский А.А., Фокина Т.А., Ким Ч.У., Краева Н.В., Рудик М.И. и др. **2006.** *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.* Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.

9. Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Михайлов В.И. **2019**. Сахалин. Землетрясения Северной Евразии, 22 (2013 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 173–183. doi:10.35540/1818-6254.2019.22.15

10. Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. **2013**. Опыт выявления предвестников сильных (М ≥ 6.0) землетрясений на Камчатке в 1998–2011 гг. по материалам КФ РЭС. *Вулканология и сейсмо-логия*, 1: 85–95.

11. Stepnov A.A., Gavrilov A.V., Konovalov A.V., Ottemoller L. **2014.** New architecture of an automated system for acquisition, storage, and processing of seismic data. *Seismic Instruments*, 50(1): 67–74. https://doi.org/10.3103/s0747923914010083

12. Yangde F., Ji G., Wenkai C. **2012**. Parallel computing for LURR of earthquake prediction. *International J. of Geophysics*, 2012: Article ID 567293, 3 p. https://doi.org/10.1155/2012/567293

13. Yin X., Yin C. **1991.** The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction. *Science in China*, 34: 977–986.

14. Yin X.C., Chen X.Z., Song Z.-P., Yin C. **1995**. A new approach to earthquake prediction: The Load/ Unload Response Ratio (LURR) theory. In: *Mechanics problems in geodynamics*, pt 1: 701–715. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-9065-6 17

15. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. **2000.** Development of a new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 157(11/12): 2365-2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7_29

Об авторах

ЗАКУПИН Александр Сергеевич (ORCID 0000-0003-0593-6417), кандидат физико-математических наук, зам. директора, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, a.zakupin@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 UDK 550.343(571.642)

TRANSLATION https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.160-168.169-177

Mid-term assessments of seismic hazards on Sakhalin Island using the LURR method: new results

© 2020 Aleksander S. Zakupin*, Nataliya V. Boginskaya

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

Abstract. A retrospective analysis of seismic regime in the central part of Sakhalin Island within the period from 1997 to 2005 by the LURR (load/unload response ratio) method is presented. Estimates were not earlier conducted for the outlined period due to a lack of data in the rated sampling of this part of the island. In the present work, additional information from two independent catalogues is adduced. Seismicity behaviour prior to the Uglegorsk earthquake of 4 August 2000 (Mw = 6.7) was considered according to the LURR method. This earthquake was up till now considered as a missed target in the series of 7 predictive assessments of Sakhalin earthquakes having a magnitude above 5.5. The computation results revealed the LURR parameter anomaly to be a precursor, on which basis the location and time of the conditionally predictable event were accurately determined. The LURR parameter anomaly was noted in the rated area in the February of 2000, 6 months prior to the earthquake's occurrence.

Keywords: seismicity, seismic events, LURR method, earthquake precursor, retrospective analysis.

For citation: Zakupin A.S., Boginskaya N.V. Mid-term assessments of seismic hazards on Sakhalin Island using the LURR method: new results. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 169–177. (In Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.160-168.169-177

Introduction

In the last few years, the staff of the Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS (IMGG FEB RAS) obtained a number of interesting results in the field of mid-terms assessments of the seismic hazard for the earthquakes with Mw > 5.5 on Sakhalin. The anomalies in the rated parameter distributions (the value deviates from the basic, that equals 1), i.e. the earthquakes precursors [Zakupin et al., 2018; Zakupin, Semenova, 2018], were revealed by the LURR method [Yin et al., 2000; Yangde et al., 2012] in six zones of the island during the period from 1998 to 2019.

In the primary source [Yin X., Yin C., 1991; Yin et al., 2000] the LURR method associates

an anomaly appearance with preparing of an earthquake with a magnitude above the upper bound of a rated sampling within the estimated area. At that the lower bound of the rated sampling is set arbitrarily to cut off the weak - background seismicity. But the upper bound shows the magnitude of an expected earthquake (mainshock). Both these thresholds are chosen subject to the character of the regional seismicity. We have found experimentally that when calculating for Sakhalin the lower bound M = 3.3, and the upper one -5.0 can be chosen as admissible variations. At the same time the revealed anomalies agree well with the earthquakes with M > 5.5. The researchers [Yin et al., 2000; Yangde et al., 2012] note that the alarm period may amount from two to several years since

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Закупин А.С., Богинская Н.В. Среднесрочные оценки сейсмической опасности на о. Сахалин методом LURR: новые результаты. *Translation by G.S. Kachesova*.

the detection moment, and the earthquake must occur in the estimated area (a linear dimension is 100 km).

The strong seismic events occurred on Sakhalin in all six revealed zones during no more than 2 years after the anomalies appearance. In four cases the anomalies were determined after the occurred earthquakes (in retrospect), and two from six zones were revealed in the mode of operative computing (conducted from 2015). It allowed to make two official predictions of the Onor (2016, Mw = 5.8) and the Krilyon (2017, Mw = 5.0) earthquakes [Zakupin et al., 2018; Zakupin, Semenova, 2018]. The predictions were considered on the sessions of Sakhalin Branch of Russian Expert Committee on Emergency Situations. Both predictions were recognized to be fully realized, although there were small deviations on source location for the Onor earthquake (at the end of predicted area) [Zakupin et al., 2018] and on magnitude for the Krilyon (Mw = 5.0). According to the data of three seismic catalogs used for estimates [Zakupin et al., 2018], there were seven earthquakes with Mw > 5.5 on the island for last 30 years: Neftegorsk (1995, Mw = 7.2), Uglegorsk (2000, Mw = 6.7), Piltun (2005, Mw = 5.6), Gornozavodsk (2006, Mw = 5.6), Nevelsk (2007, Mw = 6.2), Uanga (2010, Mw = 5.7) and Onor (2016, Mw = 5.8).

The catalog of IMGG FEB RAS stations network [Stepnov et al., 2014] was used in the computations for the north part of the island mainly from 50.0° to 54.0° N. This catalog was formed and supported by the laboratory of earthquake physics of the IMGG FEB RAS on the base of data of six stations (one of them, in the Oha city, had belonged to the Sakhalin Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey of the RAS" (SB FRC UGS RAS)). We previously used the IMGG FEB RAS catalog for estimates due to its greater availability and populating operability, despite the SB FRC UGS RAS also formed a seismic catalog on the territory, covered with the IMGG FEB RAS network. Two zones with the anomalies were revealed with its

help in 2008 and 2015. Notice that the anomaly of 2008 was weak enough – the parameter slightly exceeded the value of 2 [Zakupin et al., 2018]. The anomaly preceded the Uanga earthquake in the March of 2010, and the zone with anomaly well-nigh coincided with the earthquake epicenter. The second anomaly was significant (five times the threshold exceeding), but the center of the estimated zone was shifted in regards to the epicenter of realized prediction (Onor earthquake) for 1° northward and 0.5° eastward.

For retrospective estimates during the period from 1998 to 2005, we used the catalog of Sakhalin Island earthquakes for 1905-2005 [Poplavskaya et al., 2006]. By the data of this catalog, in 1998-2005 the number of seismic events in the range of working sampling $3.3 \le M \le 5.0$ over all parts of the island was insufficient to carried out the statistically significant computations, that highly reduces the degree of confidence in obtained results. However, because the most powerful seismic event on Sakhalin - the Neftegorsk earthquake of 1995 (Mw = 7.2) – was registered in the north of the island, the computations for the northern part of the island were carried out with this catalog (due to lack of other for that period).

The data analysis on the territory northward of 51.0° N revealed two zones of the seismic hazard in 1993 and 2004 located not far from each other – the zones of Neftegorsk and Piltun earthquakes. In spite of concerns, deficiency of rated events did not bring to false signs detection [Zakupin et al., 2018].

The catalog of SB FRC UGS RAS was used for estimates on the southern part of the island from 2003 to 2019. These data allowed to reveal a precursor of the Nevelsk earthquake in the May of 2007 [Zakupin et al., 2018], as well as to make the operative prediction in the area of Krilyon peninsula after the anomaly had been detected in 2016 [Zakupin, Semenova, 2018]. Both earthquakes occurred in the pointed zones, but the Krilyon earthquake in 2017 had a magnitude of 5.0, that was lower than expectation threshold of 5.5 that we set. In view of conventionality of this threshold (a magnitude determination by the sampling boundaries) this prediction is considered as realized.

In whole the statistics on Sakhalin appeared to be impressive, because only two strong earthquakes from eight (including the Krilyon one) had no anomalies, detected using the LURR method – the Uglegorsk (04.08.2000, Mw = 6.7)and the Gornozavodsk (17.08.2006, Mw = 5.6). The reasons in both cases are different. Computations on the Gornozavodsk earthquake have been conducted, but a precursor is not revealed, while the Uglegorsk event for that period and zone (49-51° N) has not been estimated due to shortage of data in the catalog [Poplavskaya et al., 2006]. However, a precursor of the Neftegorsk earthquake was obtained just by this catalog, which covered the period needed for estimates, and the Uglegorsk earthquake magnitude Mw = 6.7 was a little lower than the magnitude of the Neftegorsk (Mw = 7.2). Its «neglect» is more likely reasoned with absence of victims (only constructions damages have been registered). But in the statistics of estimates on Sakhalin this gap is desirable to be filled, using such volume of seismological information as possible. For this purpose, the SB FRC UGS RAS catalog was created. It has begun forming since 1997, and broadened constantly, covering all of the island. Owing to that, the result of processing by the regional catalog [Poplavskaya et al., 2006] can be confronting with the result by this catalog to take an expert decision on anomalies.

This work aims to conduct the computations on precursors detection in the zone of the Uglegorsk earthquake by the LURR method, and to demonstrate successful result by applied method, or to confirm current status of this earthquake as missed target.

Methodology

The LURR method was worked out by Chinese seismologists in the1990-s [Yin X., Yin C., 1991; Yin et al., 1995]. The abbreviation meaning is «load/unload response ratio». Briefly, the method essence is in the following [Zakupin

et al., 2018; Zakupin et al., 2020]. The method bears upon the consistent models of the elasticity theory (the model of perfectly rigid earth) and the fracture mechanics (the Mohr-Coulomb criterion). The main idea is that behind the limits of elastic deformation of the medium response to load does not correspond to response to unload. In the course of time this mismatch just becomes stronger - right up to loss of a failed object stability. The method supposes solving of the elasticity theory equations to determinate the stress tensor components on the plane, where the slip vector is located. The estimates are carried out for each earthquake in the catalog. In doing so, the shifts due to tidal affect in the specified point are taken into account. Lunar-solar tides using in the method is justified with the fact, that it is impossible to find another such ideal calibrated indicator of load/unload in the geological medium. Tectonic and lithostatic components are not taken into consideration, because their variation rates differ by orders of magnitude from the tidal. The Mohr-Coulomb criterion computation is carried out to separate earthquakes into «loading» and «unloading» ones. If an earthquake has occurred when this criterion value increasing, it is defined as «positive», in the contrary case – as «negative». The studied parameter (LURR) is identified with the ratio of the total Benioff deformation of the all positive earthquakes to the all negative ones for some time interval (in mathematical processing it is a value of running window). In elastoplastic mediums the yield phenomenon is observed prior the failure, when deformation continues to grow at constant stresses. It is apparent, that, at this state of things, the computations of the ratio of a response to load to a response to unload has no sense (there is not a reaction, as such), and mathematically the LURR parameter becomes close to 1 again. In the zone of transition from elastic deformation to inelastic this parameter begins growing and reaches its maximum values near the medium failure. That is why the main

(predicted) event may be expected in the me-

dium, where brittle fracture is realized, after

the curve have reached the maximum values. At the same time in the medium, where appearance of the plastic effects is possible, the parameter returns to the background level and some time lag appears (the lag since the moment of prediction sign detection, an anomaly – the LURR variation). Probably, this lag depends on geological conditions, however this relation cannot be understood yet. The methodology of estimates by the LURR method is described in detail in the original works [Yin X., Yin C., 1991; Yin et al., 1995; Yin et al., 2000], as well in the works of researchers, who has applied this method [Zakupin et al., 2018, 2020; Yangde et al., 2012; et al.].

We have applied the Seis-ASZ software suite worked out in the IMGG FEB RAS for computations using the LURR method with the setting of the parameters, which are standard for our estimates: window -360 days, shift -30 days, range of the magnitudes – 3.3–5.0 [Zakupin et al., 2018].

Initial materials

The estimates by the LURR method for the central part of the island, including the area, where the Uglegorsk earthquake had occurred, were conducted by two catalogs: «Regional catalog of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005» [Poplavskaya et al., 2006] and the catalog of SB FRC UGS RAS presented in the press with the annual issues (for example, [Fokina et al., 2019]). We will label them the catalogs no. 1 and no. 2 for the sake of convenience.

The first catalog covers the period from 1905 to 2005 and contains more than 3500 seismic events over Sakhalin Island. The catalog no. 2 includes the earthquakes of all the regions of the Northern Eurasia for the instrumental



M ()7.0 ()6.0-6.9 ()5.0-5.9 ()4.5-4.9 ()4.0-4.4 ()3.5-3.9 ()3.0-3.4 H ● 0.0-5.0 km ● 6.0-9.0 km ● 10.0-21.0 km ● 610 km

Figure 1. Distribution of the earthquakes epicenters within the estimated area by the data of catalogs no. 1 (left) and no. 2 (right) during the period from 1997 to 2005.

observation period since 1997 with the parameters: hypocenter, magnitude, focal mechanism, as well as macroseismic data. The seismic events with the magnitude $M \ge 3.0$ are represented in both catalogs.

The rectangular area with the coordinates from 48.0° to 50.0° N and from 141.0° to 143.0° E has been chosen for study in present work. Earthquakes sampling for computations by each catalog were carried out from 1997 (3 years before the Uglegorsk earthquake) to 2005.

The maps, constructed by the data of the catalogs no. 1 and no. 2, with the epicenters of earthquakes occurred from 1997 to 2005 within the studied area are presented in the figure 1. The sampling by the catalog no. 1 amounts 363 seismic events with $M \ge 3.0$, 188 from them are in the range of magnitudes ($3.3 \le M \le 5.0$), which are necessary for computations by the LURR method. The sampling by the second catalog amounts 566 earthquakes with $M \ge 3.0$, 320 events from them are in the $3.3 \le M \le 5.0$ range.

The spatial and depth distribution of the epicenters of seismic events is presented in the figure 1. Correlation of the data by the catalogs showed an obvious difference in the events number, as well as minor discrepancies in coordinates of the events occurred during the same time period and in the same area. The most part of the earthquakes is located in the depths range of 10–15 km as a whole, except one earthquake with a depth of 610 km, which is presented in both catalogs. Seismic activity is reduced in the depth range from 3 to 10 km by the data of the catalogs.

Comparison of the data from two catalogs points to limitation of the regional catalog of Sakhalin Island earthquakes [Poplavskaya et al., 2006] not only in a quantitative sense, that is conveniently represented on the epicenters maps, but in the assessments of energy values of seismic events, which have been probably made in different magnitude scales. It is very important to verify the estimates through comparison with the results by the sampling from the catalog no. 2 in this situation. Using of the data from catalog no. 1 is undesirable further.

Results

The LURR parameter graphs, constructed using two catalogs for the same estimated area, are identical as a whole, and that is the most important, the anomaly before the Uglegorsk earthquake is noted at the same time in both graphs (fig. 2). It is important also due to significant differences of these catalogs by earthquakes number and epicenters location. Typical increasing of the parameter by several



Figure 2. The LURR parameter within the estimated area with the coordinates of $48.0-50.0^{\circ}$ N and $141.0-143.0^{\circ}$ E during the time period from 1997–2005 by the catalogs no. 1 (a) and no. 2 (b). As an example, in the left graph the moments of alarm beginning (the anomaly) and ending are shown by the lines, and the arrow points to the Uglegorsk earthquake time.

times and its further rapid enough decreasing are observed in the February of 2000, 6 months before the earthquake.

The LURR parameter graph is shown in the figure 3 for the events from 1997 to 2019 by the catalog no. 2. As it can be seen from the graph, for 22 years an additional three significant variations have been noted, which are also defined as the parameter anomalies, besides the anomaly before the Uglegorsk earthquake. These are variations in the April of 2008, in the November of 2014 and in the February of 2019. The last of them points to the alarm period until at least the February of 2021 and may be assessed as an operative prediction. At present, the same assessments are obtained for the territory located southward of the studied area and also in the zone of the Central Sakhalin fault [Zakupin, Boginskaia, 2019]. In the variations of 2008 and 2014 the anomalies before the Uanga and Onor earthquakes, which have been early calculated by the IMGG FEB RAS catalog [Zakupin et al., 2018], can be easily recognized. Our estimated zone (48.0-50.0° N and 141.0-143.0° E) is located 200 km southward of the Uanga earthquake epicenter, but at the same time this anomaly is statistically significant, as well as the anomaly of the Onor earthquake, which epicenter is four times nearer to the estimated zone. We have earlier obtained the sign maximal by a level for the Uanga earthquake al-



Figure 3. The LURR parameter for the period from 1997 to 2019 by the data of the catalog no. 2 within the estimated area with the coordinates of $48.0^{\circ}-50.0^{\circ}$ N and $141.0^{\circ}-143.0^{\circ}$ E.

most near its epicenter by the IMGG FEB RAS catalog. But now we have received more clear expression of the sign at a greater distance from the epicenter. The anomaly for the Onor earthquake is comparable to that one, which has been revealed in the previous estimates [Zakupin et al., 2018], but there the estimated zone has been significantly distant from the epicenter of future earthquake.

Scanning (ellipse-zones searching) was carried out from 48.0° to 52.0° N for verification by the catalog no. 2. It is revealed, that the anomalies reach the maximal values in those ellipses, which centers are close to the epicenters of corresponding earthquakes (fig. 4 a, b). Also note, that the LURR anomaly before the Uglegorsk earthquake slightly increases in the ellipse-zone, which center coincides with the Onor earthquake epicenter (northward of the Uglegorsk earthquake for 1°). However, it completely disappears by further zone shifting towards the north, this can be seen in the zone, which center coincides with the Uanga earthquake. At the same time, the anomaly level before the Onor earthquake practically does not weaken in the zone of the Uanga prediction sign influence (fig. 4 b). In fact, the anomaly of the Uglegorsk earthquake is revealed in the territory bounded with the coordinates of 48.0°-51.0° N and 141.0°-143.0° E.

Let's see if predictive assessments on the Uanga and the Onor earthquakes have changed after alternative computations performing by the catalog no. 2 in comparison with the IMGG FEB RAS catalog. The map with estimated zones is shown in the figure 5 a. The maximal values of the anomalies for these two catalogs and the earthquakes epicenters are marked there. The map demonstrates that the best matching is observed for the catalog no. 2.

The scale is brought to the uniform time (since 2006) to enhance the sensing, and the LURR anomalies are shown in the figure 5 b–e for both events by two catalogs. The anomalies appearance time differs slightly, but the zones space position for the catalog no. 2 comes closer to the earthquakes epicenters. Also note, that the maxi-



Figure 4. LURR parameter estimates by the catalog no. 2 in the zones, which centers coincide with epicenters of the Onor (a) and the Uglegorsk (b) earthquakes.

mal values of the anomalies increase at a whole (especially for the Uanga earthquake). The anomaly appearance time moved back from the October to the April of 2008 for the Uanga earthquake, but it moved forward from the July to the November of 2015 for the Onor one. The minor oscillations during the anomaly appearance have not disrupted the «Sakhalin» statistics, and the average waiting time still does not exceed two years for all Sakhalin earthquakes. To be sure, the significant quality improvement of the seismic hazard assessments for these two earthquakes by the catalog no. 2 can positively characterize the data quality. Thus, using the new data (the SB FRC UGS RAS catalog) for the estimates allowed not only to reveal a retrospective precursor of the Uglegorsk earthquake (and also remove the event from the list of missed targets), but to improve the results for near (by the time and position) events, which had been considered earlier.

Let's estimate the LURR method efficiency, after new results have been obtained, by the well-known methodology [Gusev, 1974]. If the prediction is made by the concrete method for one and the same spatial zone and energy range, then the efficiency J may be determined by the following expression:



Figure 5. The map with the estimated zones (a), where the LURR anomalies by the IMGG FEB RAS and no.2 catalogs are marked for the Onor (the graphs b and c respectively) and the Uanga (the graphs d and e respectively) earthquakes.

$J = N_+ \cdot T / (N \cdot T_{alarm}),$

where N_{\perp} – the number of «expected» earthquakes, i.e. the earthquakes conforming to the successful prediction, N – the total number of occurred earthquakes with the parameters (location and energy), that conform to the prediction, $T_{\rm alarm}$ – the common alarm time, i.e. total duration of all predictions, the T – total time of the seismic situation monitoring by the considered method. The efficiency J shows, how many times the number of predicted earthquakes exceeds the number of those, which have got into the common alarm time by accident. It is clear, by accident guessing the efficiency J is equal to 1. So, in our case, when N = 8(if take the Krilyon earthquake with M = 5 into account), there were $N_{\perp} = 7$ successful predictive assessments (including retrospective). Total observation period amounted 264 mos. (1995-2017), and the alarm time summarized by 7 cases - 93 mos. In the result the J index was equal to 2.48 (contrary to 2.28 before the Uglegorsk earthquake data had been included). This value exceeds the average statistical indexes on the short-terms methods (mainly on the base of geophysical fields anomalies) more than two times [Chebrov et al., 2013].

Conclusion

The results of the LURR parameter estimates by the «Regional catalog of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005» and the SB FRC UGS RAS catalogs pointed to the existence of a zone with the anomaly, which was a precursor of the Uglegorsk earthquake (the August of 2000) in the central part of Sakhalin Island in the February, 2000. Besides, it was shown that «dangerous» zones in a space for the Uanga and Onor earthquakes (their epicenters were a close neighbor of the Uglegorsk estimated zone) were defined by the IMGG FEB RAS catalog (2006–2016 the populating period) with worse accuracy (discrepancy was up to 1°) than by the SB FRC UGS RAS catalog using.

We can add the successful retrospective estimate of the LURR parameter before the Uglegorsk earthquake to the total number of the midterm assessments of the seismic hazard, carried out by this method for Sakhalin Island. Six such predictive assessments (including the operative prediction for the Onor earthquake in 2016) were made for the earthquakes with a magnitude above 5.5 (the lower limit set by the authors for Sakhalin Island within the LURR method) during last 30 years, while there were seven real events satisfying this condition. Once more successful real time prediction by the LURR method for the Krilyon earthquake (Mw = 5.0) was made in 2017. But it stands out from the common statistics of Sakhalin earthquakes predictions by the fact, that its magnitude is actually less than the expected value.

We believe the results obtained by the LURR method have no analogs among other methods by the efficiency level of received assessments nowadays. The method will be undoubtedly relevant for the mid-term seismic hazard assessments on Sakhalin Island in future. The detailed researches are principally possible in the other seismically active regions, especially as the separate successful assessments have been made earlier in our practice (by New Zealand seismic data [Zakupin, Kamenev, 2017] and Nepal [Zakupin, Jerdeva, 2017]).

References

2. Fokina T.A., Safonov D.A., Kostylev D.V., Mikhailov V.I. **2019**. Sakhalin. In: *Zemletriaseniia Sever-noi Evrazii* [*Earthquakes in Northern Eurasia*], 22(2013): 173–183. (In Russ.). doi:10.35540/1818-6254.2019.22.15

3. Gusev A.A. **1974**. [Earthquakes prediction by the seismicity statistics]. In: Seismichnost' i seismicheskii prognoz, svoistva verkhnei mantii i ikh sviaz's vulkanizmom na Kamchatke [Seismicity and seismic prediction, properties of the upper mantle and their relation to volcanism in Kamchatka]. Novosibirsk: Nauka, 109–119. (In Russ.).

^{1.} Chebrov V.N., Saltykov V.A., Serafimova Iu.K. **2013**. Identifying the precursors of large ($M \ge 6.0$) earthquakes in Kamchatka based on data from the Kamchatka Branch of the Russian expert council on earthquake prediction: 1998–2011. *J. of Volcanology and Seismology*, 7(1): 76–85.

4. Poplavskaya L.N., Ivashchenko A.I., Oskorbin L.S., Nagornykh T.V., Permikin Yu.Yu., Poplavskii A.A., Fokina T.A., Kim Ch.U., Kraeva N.V., Rudik M.I. et al. **2006**. [*Regional catalog of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005*]. Iuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN [Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS], 103 p. (In Russ.).

5. Stepnov A.A., Gavrilov A.V., Konovalov A.V., Ottemöller L. **2014.** New architecture of an automated system for acquisition, storage, and processing of seismic data. *Seismic Instruments*, 50(1): 67–74. https://doi.org/10.3103/s0747923914010083

6. Yangde F., Ji G., Wenkai C. **2012**. Parallel computing for LURR of earthquake prediction. *International J. of Geophysics*, 2012: Article ID 567293, 3 p. https://doi.org/10.1155/2012/567293

7. Yin X., Yin C. **1991.** The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction. *Science in China*, 34: 977–986.

8. Yin X.C., Chen X.Z., Song Z.-P., Yin C. **1995**. A new approach to earthquake prediction: The Load/ Unload Response Ratio (LURR) theory. In: *Mechanics problems in geodynamics*, pt 1: 701–715. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-9065-6 17

9. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. **2000.** Development of a new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 157(11/12): 2365–2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7 29

10. Zakupin A.S., Boginskaia N.V. **2019.** Modern seismicity in the area of the Central Sakhalin fault (south of Sakhalin Island): false alarm or postponed prediction? *Geosistemy perekhodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 3(1): 27–34. (In Russ.). doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.027-034

11. Zakupin A.S., Kamenev P.A. **2017.** Space-time localization probability of enhanced seismic hazard in LURR medium-term prediction technique as applied to New Zealand territory. *Geosistemy perekhodnykh* zon = Geosystems of Transition Zones, (3): 40–49. doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.040-049.

12. Zakupin A.S., Semenova E.P. **2018**. Study of the process of preparation of strong earthquakes (Mw > 5) on Sakhalin using the LURR method. *Vestnik KRAUNTs. Fiz.-mat. nauki = Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*, 5: 83–98. (In Russ.). https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98

13. Zakupin A.S., Zherdeva O.A. **2017.** Retrospective evaluation of applicability for medium-range prediction of earthquakes within the Northern Sakhalin region. *Vestnik DVO RAN* = *Vestnik of the Far East Branch of RAS*, 1: 18–25.

14. Zakupin A.S., Levin Yu.N., Boginskaya N.V., Zherdeva O.A. **2018**. Development of medium-term prediction methods: A case study of the August 14, 2016 Onor (M = 5.8) earthquake on Sakhalin. *Russian Geology and Geophysics*, 59(11): 1526–1532. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.012

15. Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. **2020.** Application of methods of analysis of seismic sequences SDP and LURR for earthquake prediction on Sakhalin. *Geophysical Processes and Biosphere*, 19(1): 66–78. https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4

About the Authors

ZAKUPIN Alexander Sergeevich (ORCID 0000-0003-0593-6417), Cand. Sci. (Phys. and Math.), Deputy Director, Leading Researcher of the Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, a.zakupin@imgg.ru

BOGINSKAYA Nataliya Vladimirovna (ORCID 0000-0002-3126-5138), Research Officer, Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, fily77@mail.ru
УДК 550.34.094

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.178-191.192-209

Тензор сейсмического момента и динамические параметры землетрясений Центрального Тянь-Шаня

© 2020 Н.А. Сычева

Научная станция РАН в г. Бишкеке, Киргизия E-mail: nelya@gdirc.ru

Резюме. По данным сети КNET на основе метода волновой инверсии определены тензоры сейсмических моментов (TCM) 177 землетрясений с $K \ge 10.5$ ($M \ge 3.6$), произошедших на территории Центрального Тянь-Шаня с 2007 по 2017 г. Полученные решения добавлены в каталог TCM. Представлены некоторые характеристики полного каталога TCM, включающего 284 события с $2.8 \le M \le 6$ за 1996—2017 гг. Построены диаграммы азимутов главных осей напряжений и графики распределения угла погружения. Ось сжатия для большей части событий имеет север-северо-западное направление и субгоризонтальное положение, для оси растяжения не выявлено преимущественного направления, положение для большинства событий субвертикальное. Для 150 событий с 1999 по 2014 г. в дополнение к скалярному сейсмическому моменту получены динамические параметры (ДП): радиус очага (радиус Брюна) и сброс касательных напряжений. Исследованы корреляции между ДП и магнитудой. Наиболее слабой оказалась связь сброса напряжений с магнитудой землетрясения. На основе тензоров сейсмического момента из каталога TCM построено распределение коэффициента Лоде–Надаи и отмечены типы деформации, характерные для исследуемой территории. Проведено сопоставление режимов деформации с величиной сброшенных напряжений.

Ключевые слова: землетрясение, тензор сейсмического момента, скалярный сейсмический момент, моментная магнитуда, угловая частота, радиус очага, сброс касательных напряжений, коэффициент Лоде–Надаи.

Для цитирования: Сычева Н.А. Тензор сейсмического момента и динамические параметры землетрясений Центрального Тянь-Шаня. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 2, с. 178–191. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.178-191.192-209.

Seismic moment tensor and dynamic parameters of earthquakes in the Central Tien Shan

Nailia A. Sycheva

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

Abstract. In the study, seismic moment tensors (SMT) of 177 earthquakes in the Central Tien Shan with $K \ge 10.5$ ($M \ge 3.6$) occurring from 2007 to 2017 are determined on the basis of the wave inversion method and data from the KNET seismic network. The 177 obtained solutions have been added to an SMT catalogue, which includes 284 events with $2.8 \le M \le 6$ that have occurred from 1996 to 2017. Some characteristics of the SMT catalogue are discussed along with constructed principal stress axes azimuth diagrams and dip angle distribution graphs. For the most part of events, the compression axis of the seismic events has a north-northwest direction and a sub-horizontal orientation; the direction of the tension axis does not have a pronounced maximum, while for most events it has a subvertical orientation. In addition to the scalar seismic moment, the dynamic parameters (DP) of the 150 events from the SMT catalogue that have occurred from 1999 to 2014 were computed: the source radius (Brune radius) and tangential stress drop. Studied correlations between the DP and magnitude show the link between the stress drop and earthquake magnitude to be the weakest. The Lode–Nadai factor

distribution on the grounds of the seismic moment tensors from the SMT catalogue was constructed and the deformation types typical for the studied area identified. A comparison between deformation regimes and stress drop values is presented.

Keywords: earthquake, seismic moment tensor, scalar seismic moment, moment magnitude, corner frequency, source radius, stress drop, Lode–Nadai factor.

For citation: Sycheva N.A. Seismic moment tensor and dynamic parameters of earthquakes in the Central Tien Shan: translation. *Geosistemy perekhodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 192–209. (In Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.178-191.192-209.

Введение

Центральный Тянь-Шань занимает обширную территорию, окаймленную хребтами: Ферганским на западе, Заилийским, Киргизским, Таласским Алатау – на севере, Меридиональным на востоке и Кокшаал-Тоо – на юге (https://silkadv.com/ru/node/410). К Северному Тянь-Шаню принято относить Заилийский Алатау, Кунгей-Алатау, Кетмень и Киргизский Алатау (Киргизский хребет) (http://tianshan. alnaz.ru/objekty/hrebty.html). Киргизский хребет ограничивает Центральный Тянь-Шань с севера, относясь, таким образом, одновременно к обоим регионам. Сейсмологическая сеть КNЕТ, организованная в 1991 г. на территории Северного Тянь-Шаня, включает в себя 10 цифровых широкополосных станций. Основная часть станций расположена в северных предгорьях Киргизского хребта и по бортам Чуйской впадины. Несмотря на то что станции сети KNET расположены на территории Северного Тянь-Шаня, они позволяют регистрировать землетрясения, происходящие в Центральном Тянь-Шане.

На основе данных сети KNET создаются каталоги землетрясений, определяются фокальные механизмы и динамические параметры землетрясений, а также решаются другие научные задачи. Данные о фокальных механизмах очагов землетрясений используются для оценки напряженно-деформированного состояния среды. Динамические параметры землетрясений, в частности сброс касательных напряжений (далее сброс напряжений), могут также характеризовать региональные особенности геодеформационного процесса. Накопление этих данных позволяет проводить оценку геодинамических процессов, протекающих в среде.

Для расчета фокальных механизмов очагов используется два подхода: определение механизма по знаку прихода *P*-волн [Reasenberg, Oppenheimer, 1985; Snoke, 1989, 1990, 2000 и др.] и метод волновой инверсии [Dziewonski et al., 1981; Fukahata et al., 2003; Костюк и др., 2010; и др.].

Одним из условий надежного определения фокального механизма по знакам прихода Р-волн является полное окружение эпицентра пунктами наблюдений. Исходя из конфигурации станций сети KNET, определение фокального механизма этим методом возможно только для тех землетрясений, которые произошли на территории, ограниченной координатами краевых станций сети: 42.0-43.0° с.ш. и 73.75-76.0° в.д., что представляет собой небольшую территорию 100×300 км² (рис. 1). Применение метода волновой инверсии позволяет на основе данных сети KNET рассчитать тензор сейсмического момента, а значит, определить фокальный механизм также и для землетрясений, произошедших за границами расположения станций сети в пределах 1-2° (см. рис. 1). Эту территорию в данной работе мы относим к Центральному Тянь-Шаню.

Метод волновой инверсии для расчета ТСМ применяется на Научной станции РАН с 2006 г. На его основе определены тензоры сейсмических моментов 107 землетрясений за 1996–2006 гг. [Костюк, 2008; Костюк и др., 2010]. В [Костюк, 2008] отмечено хорошее согласование полученных решений с решениями, которые были представлены



Рис. 1. Эпицентральное расположение землетрясений из каталога по данным сети KNET (более 9000 событий, 1994—2017 гг.). Треугольники – станции сети KNET. Белой штриховой линией условно обозначена территория, ограниченная координатами краевых станций сети KNET. Для землетрясений этой территории фокальные механизмы определяются по знакам прихода *P*-волн. Бирюзовой линией условно обозначена территория, для которой применен метод волновой инверсии.

в каталоге СМТ (Centroid moment tensor) (https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html) для землетрясений с M > 4.5 (K > 12).

При построении очагового спектра, на основе которого рассчитываются динамические параметры землетрясения, большое значение имеет направленность излучения очага. Поэтому в работах [Sycheva, Bogomolov, 2014, 2016] при исследовании динамических параметров рассматривались только те события, которые произошли на территории, не выходящей за пределы сети KNET.

Одна из задач данной работы – определить тензоры сейсмического момента для землетрясений, произошедших в 2007–2017 гг. на территории расположения станций сети КNET и за ее границами в пределах 1–2°, и, таким образом, пополнить каталог TCM. В статье приведены основные характеристики полученного каталога.

Наличие значений угловых частот f_0 для землетрясений 1999–2014 гг., произошедших на территории Центрального Тянь-Шаня [Sychev et al., 2018], позволило также рассчитать динамические параметры (радиус очага и сброс касательных напряжений) для землетрясений с M = 2.8-6 из каталога TCM, расширив тем самым банк данных и, соответственно, территорию, для которых они определены. В дальнейшем полученные данные можно использовать для оценки напряженно-деформированного состояния исследуемой территории.

Исходные данные и методики

Методика расчета тензора сейсмического момента

Для расчета ТСМ отбирались землетрясения 2007–2017 гг., произошедшие на территории расположения станций сети КNET и за ее пределами на расстоянии $1-2^{\circ}$ в радиусе и имеющие энергетический класс $K \ge 10.5$ (M > 3.5). Рассмотрено также несколько землетрясений ниже этого класса, для которых стало возможным определение ТСМ. Расчет тензора сейсмического момента для событий 2007–2010 гг. проводился на основе волновых форм, полученных в miniSEED-формате с частотой 40 Гц с сайта консорциума *IRIS* (Incorporated

Research Institutions for Seismology) (https:// ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/data/types), а для событий 2011–2017 гг. использовались записи с частотой 100 Гц из архива Научной станции РАН. Предварительно записи землетрясений были преобразованы из формата S4 (SEED) в miniSEED-формат с использованием авторской программы [Сычев, Сычева, 2018]. Определение времен вступления *P*-волны проводилось с помощью программы SAC (Seismic Analysis Code) (http://ds.iris.edu/files/ sac-manual) по всем компонентам (*E*, *N*, *Z*).

Тензоры сейсмического момента для исследуемых землетрясений определяли с помощью программы, разработанной Ю. Яги [Yagi, 2004], которая реализует метод инверсии волн. В этой программе функция Грина рассчитывается по методу Кокецу [Kohketsu, 1985], модифицированному в [Kikuchi, Kanamori, 1991], при этом процедура инверсии строится согласно [Fukahata et al., 2003].

При расчете функции Грина для исследу-

емой территории использовалась скоростная модель Института динамики геосфер РАН [Земная..., 2006], плотности пород указаны согласно [Курскеев и др., 2004], затухание определялось на основе геологической карты [Геологическая..., 1980] и по таблицам свойств пород [Lay, Wallace, 1995]. Более подробно метод волновой инверсии описан в работах [Yagi, 2004; Костюк, 2008; Костюк и др., 2010].

Программа расчета тензоров сейсмического момента выдает графические файлы, примеры которых представлены на рис. 2. Первый пример (рис. 2 а) демонстрирует решение, полученное по 18 записям землетрясения (9 станций), второй – на основе 13 записей (6 станций) (рис. 2 b). В обоих случаях имеем хороший результат моделирования: величина расхождения волнового моделирования (variance) равна 0.08. Это говорит о том, что приемлемое решение может быть получено и при небольшом количестве ана-

b Mrr, Mtt, Mff, Mrt, Mrf, Mtf Mrr, Mtt, Mff, Mrt, Mrf, Mtf 3.98. -3.96. -0.02. -1.29. -1.09. -1.08. x10**15 1.72, -2.56, 0.84, -0.14, -1.31, 0.34, x10**14 N1:(Strike,Dip,Slip) = (85.7, 35.7, 106.5) N1:(Strike,Dip,Slip) = (126.3, 55.1, 136.0) N2:(Strike,Dip,Slip) = (245.7, 56.0, 78.5) N2:(Strike,Dip,Slip) = (245.2, 55.3, 44.2) Moment = 0.2635E+15(Nm), Mw = 3.6 Moment = 0.4449E+16(Nm), Mw = 4.4Variance = 0.0825Variance = 0.0846 ò 80 Time(sec) Ó 80

Time(sec)

Рис. 2. Пример графического выходного файла расчета тензора сейсмического момента для двух землетрясений: (a) 2017.07.29, K = 11.7; (b) 1998.11.21, K = 12.5. Красные линии – синтетические сейсмограммы, черные – исходные сейсмограммы.

лизируемых сейсмограмм. Механизмы очагов, представленные на рис. 2, имеют взбросовый характер, и азимут оси сжатия имеет субмеридиональное направление, что соответствует региональному геодинамическому режиму. Выходной графический файл содержит не только графическое изображение фокального механизма и волнового моделирования, но и оценки параметров очагов землетрясений. К таким параметрам относятся углы, характеризующие положение нодальных плоскостей (strike, dip, slip), компоненты тензора деформации, а также скалярный сейсмический момент M_0 (определяемый при инверсном методе) и моментная магнитуда M_{w} (см. рис. 2). В дальнейшем значение углов нодальных плоскостей используется для определения параметров главных осей напряжений – азимута и угла погружения – с помощью программы sdr2tpb.m из пакета SEIZMO (Passive seismology toolbox for Matlab & GNU Octave) (http://epsc.wustl. edu/~ggeuler/codes/m/seizmo).

Методика расчета динамических параметров

Радиус очага определяется формулой [Scholz, 2019; Abercrombie, Rice, 2005; Scuderi et al., 2016]

$$r = kV_S / f_0, \tag{1}$$

где f_0 – угловая частота (время разрыва в очаге), $V_{\rm S}$ – скорость S-волны, k – численный коэффициент, зависящий от модели разрыва в очаге. В нашем случае мы используем модель Брюна. При использовании простейшей модели Брюна [Brune, 1970] k = 0.37 и выражение (1) определяет так называемый радиус Брюна. Эта модель очага предполагает, что смещение происходит одновременно и «мгновенно» по всей плоскости разрыва, которая имеет форму круга с радиусом *r*. Зона очага – сферическая, с тем же радиусом.

Общее соотношение между сбросом напряжений, сейсмическим моментом и геометрическими параметрами очага [Ruff, 1999; Madariaga, 1979; Кочарян, 2016]:

$$\Delta \sigma = C_{\sigma} M_0 / S_{r_1} \approx C_{\sigma} M_0 / S^{3/2}. \tag{2}$$

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 сброшенного напряжения $\Delta \sigma$ примет форму $\Delta \sigma = C_{\sigma} M_0 / \pi r^3$. Для случая кругового разрыва значение коэффициента C_{σ} определено в работе [Eshelby, 1957]: $C_{\sigma} = 7\pi/16 \approx 1.37$, и из (2) получается выражение

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

которое наиболее часто используется для оценки величины $\Delta \sigma$ по сейсмическим данным [Brune, 1970, 1971; Scholz, 2019].

Для вычисления радиуса очага (1) необходимо знать угловую частоту f_0 и скорость *S*-волны, для вычисления сброса напряжений (3) – скалярный сейсмический момент M_0 и радиус очага *r*.

Значения угловых частот f_0 (определенных по S-волне) взяты из работы [Sychev et al., 2018], скорость S-волны сейсмогенного слоя принималась 3.5 км/с [Roecker et al., 1993], а значения скалярного сейсмического момента взяты из каталога TCM. Стоит отметить, что для расчета угловой частоты f_0 в работе [Sychev et al., 2018] рассматривались волновые формы локальных землетрясений с частотой записи 100 Гц, по которым строились спектры *P*- и S-волн.

Результаты

Характеристики каталога ТСМ

В результате применения метода инверсии к цифровым записям локальных землетрясений 2007–2017 гг. определены тензоры сейсмического момента 177 землетрясений. Как отмечено выше, 107 решений ТСМ для землетрясений 1996–2006 гг. были получены в работах [Костюк, 2008; Костюк и др., 2010].

Итоговый полный каталог TCM включает 284 события. По каждому землетрясению каталог содержит дату, время, эпицентр, глубину и энергетическую характеристику (*K*), параметры, описывающие кинематику разрыва в очаге: углы, которые характеризуют положение нодальных плоскостей (равновероятные плоскости разрыва), компоненты тензора деформации, а также азимут и угол погружения главных осей напряжений. Скалярный сейсмический момент и моментная магнитуда также представлены в каталоге. Скалярный сейсмический момент считают динамической (очаговой) характеристикой и рассматривают в качестве меры потенциальной энергии, необходимой для перемещения масс по поверхности разрыва [Пузырев, 1997].

Некоторые статистические характеристики полного каталога представлены на рис. 3. В каталоге преобладают события с магнитудой M = 3.5-4, значительная их часть произошла на глубине до 20 км. Распределение событий по времени неравномерно. Максимальное количество сейсмограмм, использованных для решения, составляет 30 (по 3 компоненты – E, N, Z на 10 станциях), но основная часть решений получена при количестве анализируемых сейсмограмм больше 5, но меньше 15 (рис. 3 d).

Распределение величины расхождения волнового моделирования (variance) в исходном и отсортированном виде представлено на рис. 3 е, f. Минимальная ошибка составляет 0.03, максимальная 0.4. Для 120 событий ошибка моделирования не превышает значения 0.1, для 140 событий – 0.2 и только для 20 событий (7 % от общего числа) находится в диапазоне 0.2–0.4 (значимая ошибка).

Фокальные механизмы

Эпицентры землетрясений из каталога TCM (284 события) и их фокальные механизмы представлены на рис. 4. Более половины событий (57 %) составляют взбросы и взбросо-сдвиги, третью часть (31 %) – горизонтальные сдвиги и надвиги, сбросы и сбросо-сдвиги малочисленны (12 %). По геологическим индикаторам Северного Тянь-Шаня восстановлены [Сим и др., 2014] общие (усредненные) неотектонические напряжения, различающиеся для поднятий и впадин. Отмечено, что деформирование положительных структур в новейший этап происходит во взбросовом поле с горизонтальной меридиональной



Рис. 3. Гистограммы распределения количества событий в каталоге TCM: а – по магнитуде; b – по глубине; с – по времени; d – по количеству анализируемых сейсмограмм. Распределение величин расхождения волнового моделирования для событий каталога тензоров сейсмического момента: е – исходный ряд; f – отсортированный ряд.

ориентацией оси сжатия и субвертикальной осью растяжения, а во впадинах – в сбросовом поле с вертикальной осью сжатия и субгоризонтальной осью растяжения, ориентированной на север-северо-восток. На основе анализа фокальных механизмов очагов землетрясений Северного и Центрального Тянь-Шаня отмечено [Крестников и др., 1987; Юнга, 1990], что для исследуемой территории характерно разнообразие механизмов очагов и наиболее характерными являются землетрясения, имеющие взбросовый, сбросо-сдвиговый и сдвиговый механизм очага.

На рис. 5 а, b представлены диаграммы распределения направлений (азимутов) осей сжатия P и растяжения T, на рис. 5 с – количественные зависимости от угла погружения этих осей. Для построения зависимостей значение азимутов усреднялось с шагом 5°, а углов погружения – с шагом 10°. Большинство осей сжатия имеют азимут 340°, что соот-

ветствует север-северо-западному направлению, и основная часть осей попадает в сектор 330°–360°, азимуты осей растяжения не имеют ярко выраженного максимума. Такое направление осей сжатия отмечается и другими исследователями для Тянь-Шаньского региона [Крестников и др., 1987; Юнга, 1990; Курскеев, 2004]. Большая часть осей сжатия имеет нулевой угол погружения (субгоризонтальное положение), а основная часть осей растяжения имеет угол погружения близкий к 60° (субвертикальное положение).

Динамические параметры

Рабочая выборка для расчета динамических параметров составила 150 землетрясений с M = 2.8-6 за 1999–2014 гг. из каталога ТСМ. Основные характеристики этих землетрясений (скалярный сейсмический момент, моментная магнитуда, угловая частота, радиус очага, сброс напряжений)



Рис. 4. Эпицентральное положение и фокальные механизмы очагов землетрясений из каталога тензоров сейсмического момента (284 события). Треугольниками обозначено положение станций сети KNET.



Рис. 5. Распределение: а – азимутов осей сжатия *P*; b – азимутов осей растяжения *T*; с – значений угла погружения осей сжатия и растяжения.

представлены в табл. 1 (см. приложение, с. 204). Скалярный сейсмический момент и моментная магнитуда для них взяты из каталога ТСМ. Рассчитаны радиус очага (радиус Брюна) и сброс касательных напряжений.

Наряду с динамическими параметрами для каждого землетрясения в таблицу включена дата, эпицентр, глубина, энергетический класс, магнитуда землетрясения, пересчитанная из класса K по формуле [Раутиан, 1960], а также количество сейсмограмм, по которым получено решение ТСМ. Зависимости угловой частоты f_0 , скалярного сейсмического момента M_0 , радиуса очага r и сброса напряжений от энергетических характеристик показаны на рисунках 6–8. Энергетическими характеристиками выбраны магнитуда M, пересчитанная из класса K, и моментная магнитуда M_w , определенная при расчете тензора сейсмического момента. Для всех рассматриваемых зависимостей определены коэффициенты корреляции, значения которых указаны на графиках.

Угловая частота для рассматриваемого класса событий (M = 2.8-6) варьирует от 1.0 до 8.9 Гц (рис. 6), что соответствует времени разрыва в очаге 1–0.11 с. Угловая частота f_0 и скалярный сейсмический момент M_0 , из которого определяется моментная магнитуда M_w , получены в разных исследованиях, тем не менее распределение угловой частоты в зависимости от M_w описывается линейной моделью лучше, чем в зависимости от M. Значение дисперсии



Рис. 6. Зависимость угловой частоты f_0 от магнитуды M, определенной из класса землетрясения K (a), и моментной магнитуды M_{w} (b).



Рис. 7. Зависимость логарифма скалярного сейсмического момента от магнитуды *M*, определенной из класса землетрясения.

распределения отклонений от линейной модели для магнитуды *M* составляет *D* = 389, для магнитуды $M_w - 322$.

Скалярный сейсмический момент для рассматриваемого класса событий варьирует в диапазоне от 2.03·10¹³ до 4.3·10¹⁷ Н·м. Зависимость M_0 от M хорошо описывается линейной моделью с положительным углом наклона: чем выше магнитуда, тем выше значение скалярного сейсмического момента (рис. 7). Эта зависимость может быть описана выражением $lg(M_0) = 10.6 + 1.03M$, что вполне соответствует выражению $lg(M_0) = 8.4 + 1.6M$ из работы [Ризниченко, 1985] (где M_0 представлен в Н·м), а также выражению, полученному для землетрясений Северного Тянь-Шаня $lg(M_0) = 10.1 + 1.1M$ [Sycheva, Bogomolov, 2016]. Отклонение значений относительно линии тренда имеет меньший разброс для событий с *M* > 4.5. Зависимость $lg(M_0)$ от M_w представляет собой линейную функцию, поскольку моментная магнитуда определяется из сейсмического момента и напрямую зависит от него [Kanamori, 1977].

Радиус очага (радиус Брюна) для исследуемых событий варьирует от 150 до 1280 м. Зависимость радиуса Брюна от M представлена на рис. 8а, а от M_w – на рис. 8b. Непо-



Рис. 8. Зависимость радиуса r (a, b) и уровня сброса напряжений $\Delta \sigma$ (c, d) от магнитуды M, определенной из класса землетрясения (a, c), и моментной магнитуды M_w (b, d).

средственная связь между радиусом Брюна и угловой частотой (уравнение (1)) отражается и в представленных распределениях: разброс значений радиуса Брюна в зависимости от M_w меньше, чем в зависимости от M.

Сброс напряжений, согласно табл. 1 (см. приложение, с. 204), меняется от ~0.2 до ~130 МПа. Зависимость распределения сброса напряжений от двух магнитуд (M и M_w) представлена на рис. 8 с и 8 d: зависимость сброса напряжений от M_w имеет меньший разброс, чем зависимость от M, что также объясняется теоретической связью сброса напряжений с радиусом Брюна и скалярным сейсмическим моментом.

Анализ коэффициента корреляции рассматриваемых зависимостей показал, что его значение для моментной магнитуды M_w выше, чем для M. Высокий уровень корреляции (0.81) получен для скалярного сейсмического момента, наименьший – для сброса напряжений (0.43, 0.62 – для M и M_w соответственно), что может указывать на слабую связь этой характеристики от магнитуды события. Чуть выше значение коэффициента корреляции для радиуса очага (0.55, 0.66).

На рис. 9 представлена зависимость распределения сброса напряжений от магнитуды M_w , при этом отдельно рассматриваются и описываются линейной моделью выборки событий с $\Delta \sigma < 20$ МПа и $\Delta \sigma \ge 20$ МПа (рис. 9 а), а также зависимость сброса напряжений $\Delta \sigma$ для событий с $M_w < 3.6$ и $M_w \ge 3.6$

(рис. 9 b). На графиках также приведено значение коэффициента корреляции рассматриваемых зависимостей. Выборки, отмеченные на рис. 9 черным цветом, описаны линейной моделью с малым угловым коэффициентом, т.е. сброс напряжений имеет мало изменяемые значения на рассматриваемом диапазоне магнитуд. Линейные модели, описывающие выборки, отмеченные красным, имеют больший угловой коэффициент, однако на рассматриваемом диапазоне магнитуд наблюдается значительный разброс значений по обе стороны от модельной линии. Коэффициент корреляции сброса напряжений и моментной магнитуды для рассматриваемых выборок имеет низкие значения, что может также свидетельствовать о том, что сброс напряжений мало зависит от магнитуды землетрясения.

Распределение коэффициента Лоде-Надаи и сброс напряжений. Для того чтобы получить представление о деформации земной коры в целом, используется коэффициент Лоде-Надаи μ_{e} , который не зависит от координатного представления тензора и может рассматриваться как его инвариантная характеристика. Стоит заметить, что, согласно [Филин, 1975], при $\mu_{e} = 1$ деформация имеет вид простого сжатия (одноосное сжатие) (при $\mu_{e} > 0$ преобладает деформация сжатия), при $\mu_{e} = -1$ деформация имеет вид простого растяжения (одноосное растяжение) (при $\mu_{e} < 0$ преобладает деформация растяжения), при $\mu_{e} = 0$ деформация имеет вид



Рис. 9. Зависимость распределения сброса напряжения от магнитуды для землетрясений: $a - c \Delta \sigma < 20 \text{ MIIa}$ (черные символы) и $\Delta \sigma \ge 20 \text{ MIIa}$ (красные); $b - c M_w < 3.6$ (черные символы) и $M_w \ge 3.6$ (красные).

простого сдвига (чистый сдвиг). На рис. 10 представлено распределение коэффициента Лоде–Надаи μ_{e} , рассчитанного на основе фокальных механизмов очагов землетрясений из каталога TCM (см. рис. 4, 284 события) по методике, описанной в работах [Юнга, 1990; Сычева, Мансуров, 2017].

Согласно рис. 10, значительная часть исследуемой территории характеризуется деформацией с преобладанием трехосного состояния, между чистым сдвигом и одноосным сжатием ($\mu_{s} > 0.2$). Высокое значение этого коэффициента характерно для центральной и восточной части Киргизского хребта, западной части хребтов Терскей и Кунгей Алатау, обрамляющих Иссык-Кульскую впадину, района Кочкорской впадины, восточной части Ат-Башинского хребта, Нарын Тоо и центральной части Таласо-Ферганского разлома. В западной части Киргизского хребта расположена область деформации с преобладанием трехосного состояния, промежуточного между чистым сдвигом и одноосным растяжением ($\mu_{e} < -0.2$). Также на исследуемой территории выделяются области чистого сдвига (впадины, см. рис. 10), которые чередуются с вышеотмеченными режимами деформации в зоне, параллельной Таласо-Ферганскому разлому и протянутой с юга на север.

На эту же карту вынесены механизмы очагов 150 землетрясений 1999-2014 гг. с M = 2.8-6, для которых рассчитаны динамические параметры. Фокальные механизмы землетрясений отмечены разным цветом в зависимости от величины сброса напряжений (см. пояснение к рис. 10). Преобладающая часть «цветных» событий имеет взбросовый механизм очага, в меньшей степени встречаются взбросо-сдвиги. Значительный сброс напряжений отмечается в центральной части Таласо-Ферганского разлома, на концевых участках хребта Байбиче Тоо, в восточной части хребта Молдо Тоо, в предгорьях западной части Киргизского хребта и в его восточной окраине, а также в западной части хреб-



Рис. 10. Распределение коэффициента Лоде–Надаи μ_{ε} и эпицентральное расположение 150 событий 1999–2014 гг. с M = 2.8-6 (табл. 1, см. приложение, с. 204), их фокальные механизмы. Красный цвет фокального механизма – землетрясения с $\Delta \sigma \ge 10$ МПа (40 событий), зеленый – $1 \le \Delta \sigma < 10$ МПа (87 событий), синий – $\Delta \sigma < 1$ МПа (23 события). Линиями обозначены региональные разломы.

тов Терскей и Кунгей Алатау. Отмечается отсутствие сброса напряжений в зоне сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины с 74.5° по 75.5° в.д. Этот же участок отсутствия значительного сброса напряжений выделен в работе [Sycheva, Bogomolov, 2016]. Значительная часть событий с $\Delta \sigma \ge 10$ расположена в областях, характеризующихся деформацией с преобладанием трехосного состояния, между чистым сдвигом и одноосным сжатием. События с $\Delta \sigma < 1$ МПа и $1 \le \Delta \sigma < 10$ большей частью располагаются в тех же областях. События с $\Delta \sigma \ge 10$ МПа отсутствуют в Суусамырской впадине и ее ближайшем окружении. Это может свидетельствовать о том, что в результате Суусамырского землетрясения (19.08.1992 г., *M* = 7.3) произошла разрядка напряжений в этой области. В работе [Сычев и др., 2019] каталог землетрясений и афтершоковая последовательность Суусамырского землетрясения рассмотрены с позиций неравновесной термодинамики с использованием статистики Тсаллиса, обобщающей классическую статистику Больцмана–Гиббса [Tsallis, 1988; Chelidze et al., 2018]. Обнаружены различия *q*-параметра статистики Тсаллиса для событий до и после Суусамырского землетрясения, указывающие на резкое возрастание взаимных корреляций в рассматриваемом регионе до главного события, резкое снижение сразу после него с дальнейшим возвратом к среднему значению, наблюдаемому до главного толчка.

Заключение

На основе метода волновой инверсии определены тензоры сейсмических моментов 177 землетрясений с $K \ge 10.5$, произошедших с 2007 по 2017 г. на территории Центрального Тянь-Шаня. Полученные решения добавлены в каталог ТСМ. Итоговый каталог включает параметры 284 событий, произошедших в 1996–2017 гг. Представлены его некоторые характеристики. Построены диаграммы азимутов осей главных напряжений: основная часть осей сжатия попадает в сектор с направлением 330–360°, из них большинство имеют угол 340°, азимуты осей растяжения не имеют ярко выраженного максимума. Преобладающая часть осей сжатия характеризуется близгоризонтальным положением, осей растяжения – близвертикальным. На исследуемой территории происходят землетрясения взбросового и взбросо-сдвигового типа, в меньшей степени встречаются горизонтальные сдвиги и взрезы, небольшой процент событий имеют сбросовый и сбрососдвиговый характер механизма очага.

Для 150 землетрясений с M = 2.8-6 из каталога тензоров сейсмического момента рассчитаны динамические параметры: радиус очага r и сброс касательных напряжений $\Delta \sigma$. Построены зависимости распределения скалярного сейсмического момента, радиуса очага и сброса напряжений от магнитуды М, пересчитанной из класса К, и моментной магнитуды М..... Коэффициенты корреляции динамических параметров и моментной магнитуды выше, чем динамических параметров и магнитуды М. Между сбросом напряжений Δσ и магнитудой наблюдается более слабая коррелятивная связь, чем между скалярным сейсмическим моментом и магнитудой и радиусом очага и магнитудой.

Распределение коэффициента Лоде-Надаи $\mu_{\rm s}$, построенное на основе каталога тензоров сейсмического момента, показывает, что большая часть исследуемой территории находится в условиях деформации с преобладанием трехосного состояния, между чистым сдвигом и одноосным сжатием ($\mu_c > 0.2$), в северо-западной части выделяется область деформации с преобладанием трехосного состояния, промежуточного между чистым сдвигом и одноосным растяжением ($\mu_{c} < -0.2$), для большей части впадин характерна деформация простого сдвига ($-0.2 \le \mu_{s} \le 0.2$). Значения коэффициента Лоде-Надаи сопоставляются с величинами сброса напряжений Δσ для 150 землетрясений. Значительный сброс напряжений характерен для областей с деформацией преобладания простого сжатия. Отмечается отсутствие значительного сброса напряжений на территории Суусамыркой впадины и ее ближайшего окружения, что свидетельствует о разрядке напряжений в этой области в связи с Суусамырским землетрясением (19.08.1992, M = 7.3) и его афтершоками (более 2000).

Список литературы

1. Геологическая карта Киргизской ССР. **1980**. Масштаб 1 : 500 000. Гл. ред. С.А. Игембердиев. Л.: Мингео СССР, 6 л.

2. Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. 2006. Отв. ред. А.Б. Бакиров. Бишкек: Илим, 116 с.

2. Костюк А.Д. **2008.** Механизмы очагов землетрясений средней силы на Северном Тянь-Шане. Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета, 8(1): 100–105.

Костюк А.Д., Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Яги Ю. 2010. Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической й геодезии. *Физика Земли*, 3: 52–65.

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

6. Крестников В.Н., Шишкин Е.И., Штанге Д.В., Юнга С.Л. **1987**. Напряженное состояние земной коры Центрального и Северного Тянь-Шаня. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 3: 13–30.

7. Курскеев А.К. **2004.** Землетрясения и сейсмическая безопасность Казахстана. Алматы: Эверо, 501 с.

8. Курскеев А.К., Белослюдцев О.М., Жданович А.Р., Серазетдинова Б.З., Степанов Б.С., Узбеков Н.Б. **2004**. *Сейсмологическая опасность орогенов Казахстана*. Алматы: Эверо, 294 с.

9. Пузырев Н.Н. **1997**. Методы и объекты сейсмических исследований. Новосибирск: Изд-во СО РАН: НИЦОИГГМ, 300 с.

10. Раутиан Т.Г. **1960**. Энергия землетрясений. *Методы детального изучения сейсмичности*. М.: Изд-во АН СССР, 176: 75–114.

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

12. Сим Л.А., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Маринин А.В. **2014**. Особенности палео- и современных напряжений Северного Тянь–Шаня. *Физика Земли*, 3: 77–91. doi:10.7868/S0002333714030107

13. Сычев В.Н., Сычева Н.А. **2018**. Программный комплекс CodaQ расчета добротности среды на основе модели однократного рассеяния: авт. свид-во № 2018610919 (КG); Научная станция РАН в г. Бишкеке. № 2017614787; заявл. 25.05.2017; опубл. 19.01.2018.

14. Сычев В.Н., Сычева Н.А., Имашев С.А. **2019**. Исследование афтершоковой последовательности Суусамырского землетрясения. *Геосистемы переходных зон*, 3(1): 35–43.

doi:10.30730/2541-8912.2019.3.1.035-043

15. 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.

16. Филин А.П. 1975. Прикладная механика твердого деформируемого тела. 1. М.: Наука, 832 с.

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

18. 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

19. 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

20. Brune J.N. 1971. Corrections. J. of Geophysical Research, 76: 5002.

21. Chelidze T. et al. (Eds) **2018**. *Complexity of seismic time series: Measurement and application*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 548 p. https://doi.org/10.1016/c2016-0-04546-1

22. Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J. H. **1981**. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4): 2825–2852. https://doi.org/10.1029/jb086ib04p02825

23. 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

24. Fukahata Yu., Yagi Y., Matsu'ura M. **2003**. Waveform inversion for seismic source processes using ABIC with two sorts of prior constraints: Comparison between proper and improper formulations. *Geophysical Research Letters*, 30. https://doi.org/10.1029/2002gl016293

25. Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquakes. J. of Geophysical Research, 82(20): 2981–2987. https://doi.org/10.1029/jb082i020p02981

26. Kikuchi M., Kanamori H. **1991**. Inversion of complex body waves-III. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(6): 2335–2350.

27. Kohketsu K. **1985**. The extended reflectivity method for synthetic nearfield seismograms. *J. of Physics of the Earth*, 33: 121–131. https://doi.org/10.4294/jpe1952.33.121

28. Lay T., Wallace T. (eds) **1995**. *Modern global seismology*. San-Diego: Academic Press, 517 p. (International Geophysics; 58).

29. 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

30. Reasenberg P.A., Oppenheimer D. **1985.** FPFIT, FPPLOT and FPPAGE: FORTRAN Computer Programs for Calculating and Displaying Earthquake Fault-Plane Solutions. US Geological Survey Open-File Report, 85–739. 109 p.

31. 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

32. 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

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

34. 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

35. Snoke J.A. **1989**. Earthquake mechanisms. In: *Encyclopedia of geophysics*. Van Nostrand Reinhold Company, 239–245. https://doi.org/10.1007/0-387-30752-4 2

36. Snoke J.A. **1990.** Clyde and the gopher: a preliminary analysis of the 12 May 1990 Sakhalin Island event. *Seismological Research Letters*, 61: 161.

37. Snoke J.A. 2000. FOCMEC: FOCal MEChanism determinations: A manual.

URL: www.geol.vt.edu/outreach/vtso/focmec/ (дата обращения: 10.04.2020).

38. Sychev I.V., Koulakov I., Sycheva N.A., Koptev A., Medved I., Khrepy S.E., Al-Arifi N. **2018.** Collisional processes in the crust of the northern Tien Shan inferred from velocity and attenuation tomography studies. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(2): 1752–1769. https://doi.org/10.1002/2017JB014826

39. Sycheva N.A., Bogomolov L. M. **2014**. Stress drop in the sources of intermediate-magnitude earthquakes in northern Tien Shan. May 2014. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, vol. 50 (3): 415–426. https://doi.org/10.1134/s1069351314030112

40. 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

41. Tsallis C. **1988**. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. *J. of Statistical Physics*, 52(1–2): 479–487. https://doi.org/10.1007/bf01016429

42. Yagi Yu. **2004.** *Determination of focal mechanism by moment tensor inversion*. Tsukuba: IISEE Lecture Note, 51 p.

Об авторе

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

UDK 550.34.094

TRANSLATION https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.178-191.192-209

Seismic moment tensor and dynamic parameters of earthquakes in the Central Tien Shan

© 2020 Nailia A. Sycheva

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

Abstract. In the study, seismic moment tensors (SMT) of 177 earthquakes in the Central Tien Shan with $K \ge 10.5$ ($M \ge 3.6$) occurring from 2007 to 2017 are determined on the basis of the wave inversion method and data from the KNET seismic network. The 177 obtained solutions have been added to an SMT catalogue, which includes 284 events with $2.8 \le M \le 6$ that have occurred from 1996 to 2017. Some characteristics of the SMT catalogue are discussed along with constructed principal stress axes azimuth diagrams and dip angle distribution graphs. For the most part of events, the compression axis of the seismic events has a north-northwest direction and a subhorizontal orientation; the direction of the tension axis does not have a pronounced maximum, while for most events it has a subvertical orientation. In addition to the scalar seismic moment, the dynamic parameters (DP) of the 150 events from the SMT catalogue that have occurred from 1999 to 2014 were computed: the source radius (Brune radius) and tangential stress drop. Studied correlations between the DP and magnitude show the link between the stress drop and earthquake magnitude to be the weakest. The Lode–Nadai factor distribution on the grounds of the seismic moment tensors from the SMT catalogue was constructed and the deformation types typical for the studied area were identified. A comparison between deformation regimes and stress drop values is presented.

Keywords: earthquake, seismic moment tensor, scalar seismic moment, moment magnitude, corner frequency, source radius, stress drop, Lode–Nadai factor.

For citation: Sycheva N.A. Seismic moment tensor and dynamic parameters of earthquakes in the Central Tien Shan. *Geosistemy perekhodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 192–209. (In Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.178-191.192-209.

Introduction

The Central Tien Chan extends over the wide territory, bounded with the Fergana Range in the west, Zailiysk, Kyrgyz and Talas Alatau ranges in the north, Meridional Range in the east and Kokshaal-Too Range in the south (https://silkadv.com/ru/node/410). It is customary to refer the Zailiysk Alatau, Kungey Alatau, Ketmen and Kyrgyz Alatau (the Kyrgyz Range) to the Northern Tien Shan (http://tianshan.alnaz.ru/objekty/hrebty.html). The Kyrgyz Range bounds the Central Tien Shan from the north, belonging thereby to both regions at once. KNET the seismic network, organized on the Northern Tien Shan in 1991, includes 10 digital wideband stations. The major part of the stations is located in northern foothills of the Kyrgyz Range and along the rims of the Chuy Depression. Despite the fact that the KNET network stations are located on the Northern Tien Shan territory, they allow to register the earthquakes occurring in the Central Tien Shan.

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Сычева Н.А. Тензор сейсмического момента и динамические параметры землетрясений Центрального Тянь-Шаня. *Translation by G.S. Kachesova*.

Based on the data of the KNET network the earthquakes catalogues are formed, focal mechanisms and dynamic parameters of earthquakes are determined, and other scientific problems are also solved. The data on focal mechanisms of earthquakes are used for estimation of stressstrain state of the medium. Earthquakes dynamic parameters, the stress drop among them, can also characterize the regional peculiarities of the crust straining process. These data accumulation allows to estimate the geodynamics processes, proceeding within the medium.

Two approaches are used for the focal mechanisms of the sources: mechanism determination by the sign of the *P*-wave arrival [Reasenberg, Oppenheimer, 1985; Snoke, 1989, 1990, 2000; et al.] and the waveform inversion method [Dziewonski et al., 1981; Fukahata et al., 2003; Kostiuk et al., 2010; et al.].

One of the conditions of reliable focal mechanism determination by the signs of the *P*-waves arrival is a total surrounding of the epicenter with observation stations. The configuration of the KNET network stations is able to reveal source mechanisms by this method only for those earthquakes, that have occurred in the territory, bounded with the coordinates of the network marginal stations: 42.0-43.0° N and 73.75–76.0° E, that represents a small area of $100 \times 300 \text{ km}^2$ (fig. 1). The waveform inversion method allows to calculate the seismic moment tensors on the base of the KNET network data and, consequently, to determine the focal mechanism also for the earthquakes occurred in the territory outside the stations location within $1-2^{\circ}$ (see the fig. 1). In present work we refer this territory to the Central Tien Shan.



Figure 1. Location of the earthquakes epicenters from the catalogue according to the KNET network (more than 9000 events, 1994–2017). Triangles – the KNET network stations. The white dashed line conventionally indicates the territory, bounded with the coordinates of the marginal stations of the KNET network. For the earthquakes in this area, focal mechanisms are determined by the signs of the *P*-waves arrival. The turquoise dashed line conventionally indicates the territory for which the waveform inversion method is applied.

The waveform inversion method for SMT computation is used at the Research Station of the RAS since 2006. On its basis the seismic moments tensors of 107 earthquakes for 1996–2006 have been determined [Kostiuk, 2008; Kostiuk et al., 2010]. The solutions obtained in [Kostiuk, 2008] are noted to conform well with those represented in the catalog of CMT (Centroid moment tensors) (https://www.globalcmt. org/CMTsearch.html) for the earthquakes with M > 4.5 (K > 12).

The source radiation directivity is very important when the source spectrum constructing, on which base the earthquakes dynamic parameters are calculated. Therefore, only those events were considered in the works [Sycheva, Bogomolov, 2014, 2016] when the source studying, which had been occurred in the territory, that was not beyond the KNET network boundaries.

The present work task is to determine the seismic moment tensors for the earthquakes, occurred in 2007–2017 in the territory of location of the KNET network stations and outside its boundaries within $1-2^\circ$, and to update the SMT catalogue by this means. Basic characteristics of the obtained catalogue are given in the article.

Availability of values of the f_0 corner frequency for the earthquakes of 1999–2014, occurred in the Central Tien Shan territory [Sychev et al., 2018], have allowed to solve the second task – to calculate the dynamic parameters (the source radius and tangential stress drop) for the earthquakes with M = 2.8-6from the SMT catalog, expanding in this way the database, and, respectively, the territory, for which they have been determined. Further, obtained data can be used for estimation of some parameters of stress-strain state of the studied territory.

Initial data and methodologies

Methodology of seismic moment tensor computation

To calculate the SMT, we took the earthquakes of 2007–2017 occurred in the KNET network stations location and outside it at a distance of $1-2^{\circ}$ in a radius with the energy class $K \ge 10.5$ (M > 3.5). We also considered several earthquakes below this class, for which the SMT determination became possible. The SMT computation for the events of 2007-2010 was carried out on the base of waveforms, obtained in miniSEED format with a frequency of 40 Hz from the website of the IRIS Consortium (Incorporated Research Institutions for Seismology) (https://ds.iris. edu/ds/nodes/dmc/data/types). And the records with a frequency of 100 Hz from the archive of the Research Station of the RAS were used for the events of 2011–2017. The earthquakes records were previously converted from the S4 (SEED) to the miniSEED format with the authoring software [Sychev, Sycheva, 2018]. Determination of the P-wave arrival time was carried out with the SAC (Seismic Analysis Code) (http://ds.iris.edu/files/sac-manual) software over all components (E, N, Z).

Seismic moment tensors for studied earthquakes have been determined with the software, developed by Yu. Yagi [Yagi, 2004], which realizes the waveform inversion method. In this software the Green's function is calculated by the Kohketsu method [Kohketsu, 1985], modified in [Kikuchi, Kanamori, 1991], at that the inversion procedure is constructed in accordance with [Fukahata et al., 2003].

When the Green's function calculating for the studied territory, the velocity model of the Institute of geosphere dynamics of the RAS [Zemnaia..., 2006] have been used, rocks densities are specified according to [Kurskeev et al., 2004], the attenuation have been determined on the base of the geological map [Geologicheskaia..., 1980] and from the tables of rock properties [Lay, Wallace,1995]. The waveform inversion method is described in detail in the works [Yagi, 2004; Kostiuk, 2008; Kostiuk et al., 2010].

The program for the seismic moment tensors computation outputs graphic files, which examples are presented in the figure 2. The first example (fig. 2 a) demonstrates the solution, obtained from 18 records of the earthquake (9 stations), the second – on the base of 13 records (6 stations) (fig. 2 b). In the both cases we have a good result of the modelling: the value of discrepancy (variance) is equal 0.08. This indicates that an acceptable solution may be obtained even with few analyzed seismograms. The focal mechanisms presented in the figure 2 have a thrust type, and the compression axis azimuth has a submeridian direction, that corresponds to the regional geodynamic regime. Output graphic file contains not only the graphic image of a focal mechanism, but the assessments of the earthquake focal parameters. These parameters are as follows: the angles describing the nodal planes position (strike, dip, slip), the deformation tensor components, as well as the M_0 scalar seismic moment (determined when the inversion method using) and the moment magnitude M_w (see the fig. 2). Then, the values of the nodes of nodal planes are used to determine the parameters of the principal stress axes – the azimuth and the dip angle – with the sdrtpb.m program from the SEIZMO Suite (Passive seismology toolbox for Matlab & GNU Octave) (http://epsc.wustl.edu/~ggeuler/ codes/m/seizmo).



Figure 2. Example of graphic output file of the seismic moment tensor computation for two earthquakes: (a) 2017.07.29, K = 11.7; (b) 1998.11.21, K = 12.5. Red lines – synthetic seismograms, black – initial seismograms.

Methodology of the dynamic parameters computation

The source radius is determined with the formula [Scholz, 2019; Abercrombie, Rice, 2005; Scuderi et al., 2016]:

$$r = kV_{s}/f_{0}, \tag{1}$$

where f_0 – corner frequency (inverse fracture time in a source), V_s – S-wave speed, k – numerical factor dependent on the model of rupture in a source. We use the Brune model in our case. The expression (1) determines the so-called Brune radius for this model [Brune, 1970], k = 0.37. The simplest Brune model supposes the slip to occur simultaneously and «instantly» over all the fault plane, that has a circle form with the r radius. The form of a source is spherical with the same radius.

General correlation between the stress drop, the seismic moment and the geometrical parameters of a source [Ruff, 1999; Madariaga, 1979; Kocharian, 2016]:

$$\Delta \sigma = C_{\sigma} M_0 / S_{r_1} \approx C_{\sigma} M_0 / S^{3/2}.$$
 (2)

The expression for the stress drop (2) may be simplified for the case of the circular fault plane with a radius r, and the square $S = \pi r^2$. It is radius r that may be accepted as a typical size of a source, r_1 , and the simplified expression for $\Delta\sigma$ takes the form $\Delta\sigma = C_{\sigma} M_0 / \pi r^3$. The value of the C_{σ} factor for this case is determined in the work [Eshelby, 1957]: $C_{\sigma} = 7\pi/16 \approx 1.37$, and we get from (2) the following expression:

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

which is most often used to estimate the $\Delta \sigma$ value by seismic data [Brune, 1970, 1971; Scholz, 2019].

One need the data on the corner frequency f_0 and the S-wave speed to calculate the source radius (1), as well as the scalar seismic moment M_0 and the source radius r – to determine the stress drop from (3).

The values of the f_0 (determined by the *S*-wave) were taken from the work [Sychev et al., 2018], the *S*-wave speed was assumed to be

3.5 km/s [Roecker et al., 1993], and the values of the scalar seismic moment were taken from the SMT catalog. It is worth noting, that the waveforms of local earthquakes with a record frequency of 100 Hz were considered to build *P*- and *S*-waves spectra and to find the corner frequency f_0 in the work [Sychev et al., 2018].

Results

Characteristics of the SMT catalog

The seismic moment tensors of 177 events have been determined as a result of the inversion method applying to digital records of local earthquakes of 2007-2017. It is already noted, that 107 SMT solutions for the earthquakes of 1996-2006 have been obtained in the works [Kostiuk, 2008; Kostiuk et al., 2010]. The final full catalogue includes 284 events. For each earthquake the catalogue contains date, time, epicenter, depth and energy characteristic (K), parameters, describing the rupture kinematics in a source: angles, which characterize the nodal planes position (equiprobable fault planes), deformation tensor components, as well as azimuth and dip angle of the stress principal axis. The scalar seismic moment is assumed to be a dynamic (focal) characteristic and is considered as a measure of potential energy necessary to move the masses over the fault surface [Puzyrev, 1997].

Some statistical characteristics of the full catalogue are presented in the figure 3. The events with a magnitude M = 3.5-4 prevail in the catalogue. Their major part is occurred at the depth down to 20 km. The temporal distribution of the events is nonuniform. Maximal number seismograms used for solving is 30 (by 3 components – *E*, *N*, *Z* at 10 stations), but most of the solutions have been obtained when analyzed seismograms quantity is more than 5, but less than 15 (fig. 3 d).

The distribution of the value of discrepancy of wave modelling (variance) in initial and sorted form is presented in the figure 3 e, f. Minimal error amounts 0.03, and maximal - 0.4. For 120 events the modelling error does not exceed the value of 0.1, for 140 events - 0.2,



Figure 3. Histograms of events distribution in the SMT catalogue: a - by magnitude; b - by depth; c - by time; d - by the number of analyzed seismograms. Distribution of variance values of wave modeling for events in the seismic moment tensors catalogue: e - initial values; f - sorted values.

and only for 20 events (7 % from the total) it is in the range of 0.2-0.4 (significant error).

Focal mechanisms

Epicenters of the earthquakes from the SMT (284 events) and their focal mechanisms are presented in the figure 4. More than half of the events (57 %) are thrust faults and strike-slip reverse faults, one third (31%) – strike-slip and overthrust faults, normal and oblique-slip faults are not numerous (12 %). Based on the geological indicators of the Northern Tien Shan the common (averaged) neotectonic stresses, differing for uplifts and depressions, were reconstructed [Sim et al., 2014]. It has been noted, that positive structures deforming within the latest phase occurs in the thrust fault field with a horizontal meridional orientation of the compression axis and the subvertical tension axis. In depressions it occurs in the normal fault field with the vertical subhorizontal tension axis, oriented to the north-northeast. On the base of analysis of the focal mechanisms of earthquakes in the Northern and Central Tien Shan it has been noted [Krestnikov et al., 1987, Yunga, 1990] that diversity of the source mechanisms is typical for the studied territory, and the most frequent focal mechanisms are thrust, oblique-slip and normal.

Figure 5 a, b represents the distribution diagrams of directions (azimuths) of the compression P and tension T axes. Quantitative dependences on the dip angle of these axes are shown in the figure 5 c. The azimuths value has been averaged with a step of 5° for dependences construction, and dip angles value – with a step of 10°. Most of the compression axes have an azimuth of 340°, that corresponds to north-northwestern direction, and the major part of these axes is in the sector of 330°–360°, azimuths of the tension axes do not have a pronounced maximum. Such direction of the compression axes is also noted by other researchers for the Tien Shan region [Krestnikov et al., 1987; Yunga, 1990; Kurskeev, 2004]. Most of the compression axes have a zero dip angle (subhorizontal position), and the major part of the tension axes has a dip angle close to 60° (subvertical position).

Dynamic parameters

Working sampling of the dynamic parameters has amounted 150 earthquakes with M = 2.8-6 for 1999–2014 from the SMT catalog. These earthquakes main characteristics (scalar seismic moment, moment magnitude, corner frequency, source radius, stress drop) are presented in the table 1 (see the appendix). The scalar seismic moment and the moment magnitude for these earthquakes are taken from the SMT catalog. The source radius (Brune radius) and the tangential stress drop are calculated.

Together with the dynamic parameters for each earthquake, we have included in the table date, epicenter, depth, energy class, earthquake magnitude converted from the class K by the formula [Rautian, 1960], as well as number of seismograms, on which the SMT solution has been obtained. Dependences of the corner frequency f_0 , the scalar moment M_0 , the source radius r and the stress drop on energy characteristics are shown in the figures 6–8. We have chosen the magnitude M, converted from the class K, as energy characteristics, and the moment magnitude M_w , determined when the seismic moment tensor calculating. For all considered dependences the correlation factors are determined, their values are specified in the figures.

The corner frequency for considered class of events (M = 2.8-6) varies from 0.1 to 8.9 Hz (fig. 6), that corresponds to the rupture time in a source 1–0.11 s. The corner frequency f_0 and the scalar seismic moment M_0 , from which the moment magnitude M_w is determined, are



Figure 4. Epicenter location and the focal mechanisms of earthquake sources from the catalog of seismic moment tensors (284 events). The KNET stations are designated with the triangles.



Figure 5. Distribution of: a – azimuths of the compression axes P; b – azimuths of the tension axes T; c – dip angle values of both compression and tension axes.

obtained in the different studies. Nevertheless, distribution of the corner frequency depending on the M_w is described with a linear model better than that depending on the M. The variance value of distribution of the deviations from a linear model for the magnitude M amounts D = 389, and for the magnitude $M_w - 322$.

The scalar seismic moment for the considered class of events varies within the range from $2.03 \cdot 10^{13}$ to $4.3 \cdot 10^{17}$ N·m. M_0 dependence on M is described well with a linear model with positive dip angle: the higher is the magnitude, the higher the value of the scalar seismic moment (fig. 7). This dependence can be described with the expression $lg(M_0) = 10.6 + 1.03M$, that fully corresponds to the expression $lg(M_0) = 8.4 + 1.6M$ from the work [Riznichenko, 1985] (where M_0 represented in N·m), and also to the expression, obtained for the earthquakes of the Northern Tien Shan $lg(M_0) = 10.1 + 1.1M$ [Sycheva, Bogomolov, 2016]. Values deviation relative to the trend line has lowest variance for the events with M > 4.5. Dependence of $lg(M_0)$ on M_w is a linear function, as the moment magnitude is determined from the seismic moment and directly depends on it [Kanamori, 1977].

The source radius (Brune radius) for the studied events varies from 150 to 1280 m.



Figure 6. The corner frequency f_0 dependence on the magnitude M, determined by the earthquake class (a), and the moment magnitude M_w (b).



Figure 7. Dependence of the scalar seismic moment logarithm on the magnitude *M*, determined by the earthquake *K*-class.

The Brune radius dependence on M is presented in the figure 8 a, and on M_w – in the figure 8 b. Direct relation between the Brune radius and the corner frequency (equation (1)) is also reflected in presented distributions: dispersion of the values of the Brune radius depending on the M_w is less than depending on M.

According to the table 1 (see the appendix) the stress drop, varies from ~0.2 to ~130 MPa. Dependences of stress drop distribution on two magnitudes (M and M_w) are presented in the figure 8 c and 8 d: the stress drop dependence on M_w has lowest dispersion than on M, that is also explained with theoretical relation of the stress drop with the Brune radius and the scalar seismic moment.

Analysis of the factor of considered dependences correlation has shown its value to be higher for the moment magnitude M_w than for the *M*. High correlation level (0.81) is obtained for the scalar seismic moment, and the least one – for the stress drop (0.43, 0.62 – for *M*



Figure 8. The radius r (a, b) and the stress drop $\Delta \sigma$ (c, d) dependences on the magnitude M, determined from the earthquake class K (a, c), and the moment magnitude M_w (b, d).



Figure 9. The stress drop distribution dependences on magnitude for the earthquakes: a – with $\Delta\sigma < 20$ MPa (black) and with $\Delta\sigma \ge 20$ MPa (red); b – with $M_w < 3.6$ (black) and with $M_w \ge 3.6$ (red).

and $M_{\rm w}$ respectively), that may point to weak relation between this characteristic and the magnitude of event. The value of correlation factor is a little higher for the source radius (0.55, 0.66).

Dependence of the stress drop distribution on the magnitude M_{w} is presented in the figure 9. Besides, we separately consider and describe by a linear model the events samplings with $\Delta \sigma < 20$ MPa and $\Delta \sigma \ge 20$ MPa (fig. 9 a), as well as dependences of the stress drop $\Delta \sigma$ for the events with $M_w < 3.6$ and $M_w \ge 3.6$ (fig. 9 b). In the graphs the value of the correlation factor of considered dependences is also presented. The samplings, marked in the figure 9 with black color, are described by a linear model with small angle factor, i.e. the stress drop has slightly variable values within the considered range of the magnitudes. Linear models describing the samplings and marked with red have greater angle factor. However, there is a significant dispersion of values on both sides of the model line within the considered range. The correlation factor of the stress drop and moment magnitude for the considered samplings has low values, that may testify to small dependence of the stress drop on the earthquake magnitude.

Lode–Nadai factor distribution and the stress drop. In order for gaining an idea of the deformation of the Earth crust as a whole, the Lode– Nadai factor μ_e is used. It does not depend on the tensor's coordinate representation and may be considered as its invariant characteristic. It is worth noting, that, according to [Filin, 1975], when $\mu_{e} = 1$ the deformation has a form of a simple compression (uniaxial compression) (when $\mu_e > 0$ the compressive deformation prevails), when $\mu_e = -1$ the deformation has a form of a simple tension (uniaxial tension) (when $\mu_{a} < 0$ the tensile deformation prevails), when $\mu_{e} = 0$ the deformation has a form of a simple shear (pure shear). The figure 10 shows the distribution of the Lode-Nadai factor μ_{e} , calculated on the grounds of the focal mechanisms of earthquakes sources from the SMT catalog (see the figure 4, 284 events) by the methodology, described in the works [Yunga, 1990; Sycheva, Mansurov, 2017].

According to the figure 10, the major part of the studied territory is characterized by the deformation with domination of triaxial state between the pure shear and uniaxial compression ($\mu_e > 0.2$). High value of this factor is typical for the central and eastern parts of the Kyrgyz Range, western part of the Terskey and Kungey Alatau surrounding the Issyk-Kul depression, the Kochkor depression area, the eastern part of the At-Bashy Range, the Naryn-Tau and the central part of the Talas-Fergana Fault. In the western part of the Kyrgyz Range, the deformation zone with domination of triaxial state between the pure shear and uniaxial tension ($\mu_e^{<}$ -0.2) is located. Also, in the studied territory the zones of a pure shear (depressions, see the figure 10) are distinguished. They alternate with mentioned above deformation regimes in the zone parallel with the Talas-Fergana Fault and extended from south to north.

On the same map we marked the mechanisms of sources of 150 earthquakes of 1999–2014 with M = 2.8-6, for which the dynamic parameters had been calculated. The focal mechanisms of the earthquakes are marked with different colors depending on the value of the stress drop (see explanation to the figure 10). The major part of the «colored» events has thrust focal mechanism, and the minor part – strike-slip reverse mechanism. Significant stress drop is observed in the central part of the Talas-Fergana Fault, at the end-areas of the Baibiche-Tau Range. in the eastern part of the Moldo Too Range, in the foothills of the western part of the Kyrgyz Range and in its eastern margin, as well in the western part of the Terskey and Kungey Alatau ranges. Absence of the stress drop is marked in a joint zone of the Kyrgyz Range and Chuy depression from 74.5° to 75.5° E. The same area of the significant stress drop absence is distinguished in the work [Sycheva, Bogomolov, 2016]. The most of events with $\Delta \sigma \ge 10$ are located in the zones, characterized by deformation with domination of triaxial state between the pure shear and uniaxial compression. The events with $\Delta \sigma < 1$ MPa and $1 < \Delta \sigma < 10$ are mostly located in the same areas. The events with $\Delta \sigma \ge 10$ MPa are absent in the Suusamyr depression ant its vicinity. It indicates possibly that the stress drop occurred in this area as a result of the Suusamyr



Figure 10. The Lode–Nadai factor μ_e distribution and epicentral location of 150 events of 1999–2014 with M = 2.8-6 (table 1, see the appendix) and their focal mechanisms. Red color of the focal mechanism – the earthquakes with $\Delta \sigma \ge 10$ MPa (40 events), green – $1 \le \Delta \sigma < 10$ MPa (87 events), blue – $\Delta \sigma < 1$ MPa (23 events). The regional faults are marked with black lines.

earthquake (19.08.1992, M = 7.3). In the work [Sychev et al., 2019] the earthquakes catalogue and aftershock sequence of the Suusamyr earthquake have been considered in the context of nonequilibrium thermodynamics with using the Tsallis statistics, generalizing the classic Boltzmann-Gibbs statistics [Tsallis, 1988; Chelidze et al., 2018]. The differences in qparameter of the Tsallis statistics have been revealed before and after the Suusamyr earthquake. Also, an abrupt increase of cross-correlations took place in the studied region before the main shock, with the sharp decrease immediately after it, and further return to the average value, observed before the mainshock.

Conclusion

Based on the waveform inversion method, we determined the seismic moment tensors for 177 earthquakes with $K \ge 10.5$, occurred from 2007 to 2017 in the territory of the Central Tien Shan. Obtained solutions have been included in the SMT catalog. The final catalogue includes the parameters of 284 events, occurred in 1996–2017 Some its characteristics are presented. The diagrams of the azimuths of principal stresses axes are constructed: the major part of compression axes falls in the sector with a direction of 330-360°, most of them have an angle of 340°, the azimuths of tension axes do not have an explicit maximum. The dominant part of compression axes is characterized with nearhorizontal position and tension axes – with nearvertical one. A majority of earthquakes occurred in the studied territory are of thrust and strikeslip reverse type of fault, and the minority – strike-slip faults and incisions. Only small fraction of the events has a normal and oblique-slip type of focal mechanism.

For the 150 earthquakes with M = 2.8-6from the seismic moment tensors catalogue the dynamic parameters have been calculated: the source radius r and the stress drop $\Delta \sigma$. The dependences of the scalar moment distribution, the source radius and the stress drop on the magnitude M converted from the class K, and the moment magnitude $M_{\rm w}$ have been constructed. The correlation coefficients of the dynamic parameters and the moment magnitude are higher than that of the dynamic parameters and the magnitude converted from the class. Weaker correlation takes place between the stress drop $\Delta \sigma$ and the magnitude in comparison with the correlation between the scalar seismic moment and the magnitude, as well as between the source radius and the magnitude.

The Lode–Nadai factor μ_{s} distribution, constructed on the base of the seismic moment catalogue, demonstrates that the most part of the studied territory is in the conditions of deformation with triaxial state between the pure shear and uniaxial compression domination ($\mu_{\epsilon} > 0.2$), in the north-western part the deformation area with of triaxial state between the pure shear and uniaxial tension domination ($\mu_{e} < -0.2$) is distinguished, for the major part of the depressions the pure shear deformation (-0.2 $\leq \mu_{\rm s} \leq 0.2$) is typical. Values of the Lode-Nadai factor are compared with values of the stress drop $\Delta \sigma$ for the 150 earthquakes. The significant stress drop is character for the areas with the deformation of a simple compression prevailing. Absence of the significant stress drop in the territory of the Suusamyr depression and its vicinity is noted. This may be a signature of nonlocal stress unloading resulted from the Suusamyr earthquake (19.08.1992, M = 7.3) and its aftershocks (more than 2000).

Appendix / Приложение

N⁰	Date	Time	φ°	λ°	H, km	K	М	$M_0, 10^{14}$ N·m	M _w	f ₀ , Hz	r, m	Δσ, MPa	N _{obs}
1	14.04.1999	12:41:22.19	43.64	74.50	15.90	10.66	03.70	1.01	3.27	5.59	233	3.48	6
2	24.05.1999	07:39:21.39	42.66	75.04	06.80	10.65	03.69	1.15	3.31	4.88	267	2.64	7
3	13.02.2000	09:46:07.60	41.71	73.00	04.10	12.02	04.46	13.8	4.03	3.93	332	16.52	7
4	01.07.2000	20:33:58.86	41.16	73.63	00.00	11.75	04.31	54.6	4.43	2.69	485	21.00	10
5	14.07.2000	08:22:46.84	41.38	73.17	00.10	10.62	03.68	18.5	4.11	2.42	539	5.17	13
6	28.07.2000	08:56:26.91	42.58	74.80	16.20	11.19	03.99	1.32	3.35	4.04	323	1.72	15
7	08.08.2000	01:15:07.58	42.24	76.89	00.20	12.72	04.84	181.0	4.77	2.00	652	28.56	8
8	02.03.2001	06:18:30.26	40.88	74.08	00.00	10.62	03.68	5.28	3.75	2.35	555	1.35	7
9	10.04.2001	00:13:24.43	41.77	73.19	00.00	10.32	03.51	4.01	3.67	2.23	585	0.88	10
10	09.05.2001	11:14:16.23	41.74	73.08	00.00	10.04	03.36	1.34	3.40	2.35	555	0.34	19
11	22.05.2001	15:02:33.55	42.15	76.18	13.20	12.06	04.48	16.1	4.08	1.95	668	2.36	17
12	08.07.2001	11:51:52.68	42.14	74.98	14.10	11.18	03.99	1.60	3.41	6.40	204	8.27	10
13	18.08.2001	01:12:04.20	42.17	73.25	05.80	10.04	03.36	1.10	3.14	3.83	340	1.22	7
14	20.08.2001	01:27:05.74	42.14	74.98	06.90	10.47	03.59	1.64	3.41	3.83	340	1.82	11
15	13.09.2001	12:00:30.35	41.30	75.63	00.90	11.56	04.20	42.2	4.35	3.73	349	43.25	8
16	09.10.2001	00:24:30.84	42.01	76.40	00.00	11.31	04.06	5.07	3.74	2.48	526	1.53	8
17	18.11.2001	01:28:55.44	42.59	74.14	06.50	12.65	04.81	20.0	4.14	3.34	390	14.70	15
18	26.02.2002	01:37:22.48	42.74	73.09	00.00	11.47	04.15	4.23	3.69	4.88	267	9.72	11
19	28.03.2002	22:36:21.12	41.60	73.29	05.20	11.40	04.11	2.94	3.58	6.23	209	14.04	14
20	17.06.2002	21:03:47.98	42.14	73.75	07.90	10.97	03.87	2.56	3.54	4.15	314	3.62	14
21	31.08.2002	17:46:38.13	41.59	73.27	10.00	10.41	03.56	0.80	3.21	3.43	380	0.64	8
22	27.10.2002	01:26:38.65	42.92	76.23	07.00	10.26	03.48	1.05	3.29	5.59	233	3.64	6
23	08.12.2002	22:10:39.77	41.87	72.40	00.10	10.91	03.84	6.20	3.80	1.57	830	0.47	11
24	21.02.2003	10:35:22.15	42.53	74.47	13.10	11.66	04.26	2.10	3.49	5.44	240	6.68	8
25	09.03.2003	00:32:05.75	41.23	72.97	00.10	11.68	04.27	1.17	4.65	1.79	728	13.27	19
26	22.05.2003	18:11:55.01	42.99	72.81	07.00	14.26	05.70	1.43	5.37	1.33	980	66.60	14
27	22.05.2003	19:03:57.95	42.99	72.82	05.70	11.02	03.90	3.33	3.62	3.25	401	2.26	5
28	22.05.2003	19:34:47.18	43.06	72.83	06.60	11.21	04.01	3.53	3.63	3.34	390	2.60	10
29	23.05.2003	00:16:04.86	43.00	72.81	06.40	11.47	04.15	8.07	3.87	6.76	193	49.24	14
30	25.05.2003	22:44:22.26	42.98	72.81	12.20	10.14	03.41	1.11	3.30	2.69	485	0.43	9
31	28.07.2003	04:57:29.84	41.64	74.67	02.80	11.44	04.13	6.75	3.82	3.43	380	5.38	16
32	26.08.2003	18:58:17.38	40.98	74.94	00.90	10.37	03.54	6.59	3.82	2.92	446	3.24	11
33	06.10.2003	02:51:34.14	41.25	76.45	00.00	11.13	03.96	5.34	3.75	2.69	485	2.05	12
34	06.10.2003	16:42:13.93	42.50	74.48	16.40	11.95	04.42	2.19	3.50	4.15	314	3.09	13
35	18.11.2003	06:49:56.55	41.26	76.46	00.00	10.83	03.79	2.07	3.48	3.00	434	1.11	9
36	16.01.2004	09:06:17.90	42.55	75.30	14.00	13.68	05.38	79.2	4.54	1.26	1035	3.13	17

Table 1. Some parameters of the 150 earthquakes of 1999–2014, *M* = 2.8–6 and their dynamic parameters *Таблица 1.* Характеристики 150 землетрясений 1999–2014 гг. с *M* = 2.8–6 и их динамические параметры

GEOPHYSICS, SEISMOLOGY

10	Dit	т'		10	TT 1	V	м	$M_{o}, 10^{14}$		C II-		Δσ,	N
JNO	Date	Time	φ-	λ-	H, KM	ĸ	M	Ñ∙m	IVI w	1 ₀ , HZ	r, m	MPa	IN _{obs}
37	25.04.2004	04:15:18.19	41.54	74.93	15.50	10.85	03.81	2.39	3.52	3.83	340	2.65	10
38	02.06.2004	17:15:10.82	42.28	74.91	17.90	13.25	05.14	36.7	4.31	1.95	668	5.38	16
39	02.08.2004	18:20:11.89	41.35	72.90	00.60	09.88	03.27	1.54	3.39	2.35	555	0.39	6
40	26.08.2004	20:23:22.86	41.85	72.56	00.00	10.49	03.61	1.80	3.44	1.61	810	0.15	6
41	15.10.2004	13:45:56.82	41.02	74.56	00.00	11.25	04.03	7.78	3.86	4.27	305	11.97	8
42	27.11.2004	12:42:54.30	42.61	74.84	15.10	10.57	03.65	0.93	3.25	3.00	434	0.50	14
43	29.11.2004	00:44:54.94	41.62	75.31	17.00	11.78	04.32	12.9	4.01	5.44	240	40.99	19
44	20.04.2005	17:48:53.10	42.41	76.49	06.70	11.33	04.07	4.43	3.70	3.34	390	3.26	13
45	08.06.2005	21:05:21.44	42.16	75.09	17.20	10.63	03.68	0.98	3.26	4.63	282	1.93	8
46	20.06.2005	14:25:01.50	42.77	74.38	23.30	11.95	04.42	2.33	3.51	4.63	282	4.56	14
47	05.07.2005	03:07:24.82	41.60	74.76	18.40	12.47	04.71	33.3	4.28	3.43	380	26.53	6
48	07.07.2005	19:22:05.42	42.66	74.84	11.90	10.89	03.83	1.27	3.34	3.00	434	0.68	9
49	07.07.2005	21:00:07.50	42.65	74.82	11.00	10.78	03.77	1.32	3.35	2.42	539	0.37	12
50	03.10.2005	09:28:26.24	42.65	74.82	11.90	10.75	03.75	0.82	3.21	2.77	471	0.35	8
51	08.10.2005	06:25:58.93	42.10	76.05	06.80	12.34	04.63	38.2	4.33	4.38	298	63.48	13
52	27.12.2005	00:55:30.54	42.71	75.89	06.20	11.60	04.22	3.60	3.64	6.76	193	21.99	12
53	28.12.2005	01:52:48.29	42.69	75.41	12.50	11.92	04.40	19.2	4.12	1.44	905	1.13	12
54	29.12.2005	08:50:32.76	42.69	75.39	06.40	10.51	03.62	1.5	3.39	4.27	305	2.35	8
55	01.01.2006	08:56:53.85	42.60	75.25	22.20	10.97	03.87	3.36	3.62	2.23	585	0.73	6
56	27.03.2006	09:49:33.57	42.16	73.23	00.00	09.88	03.27	1.98	3.47	4.27	305	3.05	9
57	24.05.2006	13:17:54.27	42.67	72.96	12.60	11.65	04.25	13.8	4.03	4.88	267	31.73	19
58	12.06.2006	17:53:49.37	41.44	75.84	01.20	09.79	03.22	2.93	3.58	5.59	233	10.10	11
59	08.07.2006	18:58:20.37	41.61	73.25	13.50	10.46	03.59	2.39	3.52	3.73	349	2.45	8
60	13.07.2006	10:09:30.85	42.76	75.85	11.10	09.47	03.04	1.19	3.32	4.38	298	1.98	5
61	22.07.2006	05:08:23.35	41.67	76.13	07.40	10.09	03.38	0.87	3.23	4.38	298	1.44	7
62	24.07.2006	15:53:48.77	41.64	73.15	08.30	10.53	03.63	3.20	3.61	5.90	221	12.96	7
63	30.07.2006	11:48:16.11	41.65	72.67	03.00	11.80	04.33	68.1	4.49	3.63	359	64.34	11
64	30.07.2006	13:13:40.61	41.67	72.78	00.00	10.05	03.36	1.10	3.30	5.30	246	3.24	7
65	13.08.2006	06:10:13.41	41.65	72.75	00.00	11.95	04.42	20.4	4.14	2.05	636	3.47	17
66	15.08.2006	18:58:22.87	42.60	75.11	10.20	10.18	03.43	1.17	3.31	4.63	282	2.28	10
67	18.08.2006	15:41:10.87	41.67	72.75	00.00	10.56	03.64	2.43	3.53	2.92	446	1.19	7
68	29.08.2006	07:54:16.36	41.69	72.83	00.00	10.33	03.52	2.36	3.52	5.30	246	6.95	5
69	22.10.2006	11:01:32.21	42.16	73.36	06.60	10.93	03.85	3.64	3.64	3.63	359	3.43	9
70	08.11.2006	02:21:26.94	42.56	75.36	18.60	13.37	05.21	94.20	4.59	2.48	526	28.37	21
71	08.11.2006	02:26:50.84	42.57	75.35	20.10	10.94	03.86	3.70	3.65	4.75	274	7.84	4
72	25.12.2006	20:00:58.32	42.11	76.03	00.10	14.83	06.02	4370.0	5.70	1.02	1278	91.51	12
73	02.01.2007	04:06:54.03	42.31	77.97	00.40	09.99	03.33	5.80	3.78	4.27	305	8.91	6
74	02.03.2007	12:57:05.93	41.27	73.04	01.60	09.82	03.23	0.54	3.09	5.75	227	2.01	4
75	20.03.2007	03:17:54.83	41.34	73.54	04.60	10.75	03.75	3.39	3.62	5.59	233	11.70	4

SEISMIC MOMENT TENSOR AND DYNAMIC PARAMETERS OF EARTHQUAKES IN THE CENTRAL TIEN SHAN

N₂	Date	Time	φ°	λ°	H, km	K	М	$M_0^{0}, 10^{14}$ N·m	M _w	f ₀ , Hz	r, m	Δσ, MPa	N _{obs}
76	27.05.2007	01:30:53.75	41.74	73.05	14.40	11.75	04.31	11.6	3.98	2.05	636	1.98	18
77	06.06.2007	11:09:25.58	42.57	75.40	13.00	13.25	05.14	135.0	4.69	1.84	708	16.65	21
78	09.10.2007	16:00:41.39	42.98	77.67	00.00	12.82	04.90	80.3	4.54	2.29	569	19.05	7
79	21.10.2007	14:08:44.42	42.57	75.35	13.60	10.96	03.87	1.21	3.33	2.42	539	0.34	7
80	04.01.2008	15:38:16.48	43.36	75.41	07.00	10.75	03.75	2.76	3.56	6.40	204	14.27	6
81	08.01.2008	18:04:13.75	42.05	75.20	16.80	11.00	03.89	1.42	3.37	3.34	390	1.04	5
82	12.01.2008	01:53:05.09	43.28	74.85	13.00	10.09	03.38	0.32	2.94	5.02	260	0.79	6
83	30.01.2008	15:28:43.39	41.63	73.19	11.20	10.29	03.49	2.01	3.47	4.75	274	4.26	7
84	03.02.2008	04:57:07.55	41.94	76.47	00.00	09.99	03.33	1.57	3.40	3.73	349	1.61	8
85	04.04.2008	07:21:26.61	41.54	72.60	10.00	41.80	21.00	1.26	3.34	3.83	340	1.40	7
86	25.06.2008	21:09:29.86	41.30	73.89	00.70	10.28	03.49	4.96	3.73	3.83	340	5.50	18
87	19.08.2008	19:52:39.54	41.32	75.70	00.10	09.43	03.02	0.64	3.14	4.04	323	0.83	6
88	21.08.2008	17:19:51.67	41.97	76.02	14.20	11.78	04.32	14.4	4.04	2.69	485	5.52	19
89	20.09.2008	04:15:52.27	42.27	74.86	21.70	10.60	03.67	0.80	3.20	7.33	178	6.20	4
90	19.10.2008	01:27:14.11	41.34	75.76	07.10	09.66	03.14	3.53	3.64	8.86	147	48.47	3
91	02.11.2008	17:58:26.98	42.71	76.49	04.10	10.31	03.51	1.41	3.37	7.53	173	11.92	5
92	03.12.2008	04:26:28.64	42.68	73.20	11.00	12.75	04.86	61.7	4.46	2.42	539	17.27	19
93	22.01.2009	12:55:14.19	42.61	74.49	16.90	09.86	03.26	1.48	3.38	6.07	215	6.54	4
94	01.02.2009	11:25:38.02	42.75	73.86	14.90	12.29	04.61	9.07	3.91	3.83	340	10.06	15
95	27.04.2009	20:04:12.18	42.97	72.41	08.80	12.85	04.92	236.0	4.85	1.41	924	13.06	11
96	05.05.2009	06:19:05.59	41.47	73.50	00.00	09.93	03.29	1.73	3.43	3.00	434	0.92	7
97	16.05.2009	05:38:46.20	42.59	74.19	06.00	10.10	03.39	0.82	3.21	7.14	183	5.89	7
98	24.05.2009	00:08:40.93	42.61	74.60	12.60	10.54	03.63	0.41	3.01	6.58	198	2.30	11
99	25.07.2009	14:57:10.42	42.58	75.71	12.10	10.46	03.59	1.85	3.45	3.00	434	0.99	8
100	07.08.2009	04:32:46.39	42.01	75.72	05.60	11.80	04.33	4.22	3.69	4.04	323	5.49	7
101	24.09.2009	07:57:10.94	42.08	77.51	08.20	11.85	04.36	90.0	4.57	4.15	314	127.10	5
102	11.10.2009	06:25:45.82	43.14	74.97	20.10	11.69	04.27	5.21	3.75	2.29	569	1.24	4
103	02.11.2009	19:46:34.03	41.67	75.01	17.80	10.39	03.55	1.71	3.42	6.76	193	10.41	3
104	07.12.2009	18:05:51.07	41.35	75.86	00.00	10.15	03.42	2.22	3.50	2.42	539	0.62	13
105	22.12.2009	05:54:31.37	41.75	73.14	00.10	11.04	03.91	5.09	3.74	1.61	810	0.42	15
106	24.12.2009	02:15:46.95	42.88	72.45	14.40	11.17	03.98	8.72	3.90	2.42	539	2.44	7
107	02.03.2010	01:55:36.02	42.43	75.66	19.30	13.34	05.19	232.0	4.85	2.23	585	50.71	16
108	02.03.2010	04:17:40.13	42.44	75.65	19.90	10.95	03.86	2.18	3.50	5.30	246	6.42	9
109	03.06.2010	10:36:14.15	41.88	76.70	02.40	09.46	03.03	1.83	3.44	6.23	209	8.73	10
110	24.07.2010	04:19:32.96	41.42	73.11	00.20	09.53	03.07	1.60	3.41	4.27	305	2.46	5
111	09.09.2010	18:31:50.35	42.31	75.15	18.80	11.04	03.91	0.65	3.14	5.75	227	2.42	8
112	20.09.2010	09:07:15.09	41.59	73.19	12.20	10.17	03.43	2.28	3.51	3.17	411	1.43	4
113	29.09.2010	07:30:07.97	42.25	75.45	17.10	10.01	03.34	0.62	3.13	7.74	168	5.65	4
114	27.10.2010	04:48:02.87	41.46	73.24	10.80	11.80	04.33	20.2	4.14	1.52	858	1.40	24
115	19.12.2010	19:12:48.85	42.54	74.70	06.90	09.84	03.24	0.20	2.81	7.74	168	1.86	5

GEOPHYSICS, SEISMOLOGY

N₂	Date	Time	φ°	λ°	H, km	K	М	$M_0^{0}, 10^{14}$ N·m	M _w	f ₀ , Hz	r, m	Δσ, MPa	N _{obs}
116	18.03.2011	09:36:26.66	43.02	74.95	16.30	12.19	04.55	10.6	3.95	3.83	340	11.74	17
117	23.03.2011	20:19:43.71	43.02	74.89	18.50	10.49	03.61	2.45	3.53	5.44	240	7.79	7
118	09.04.2011	12:30:24.93	42.02	74.84	20.60	12.49	04.72	29.0	4.24	1.65	790	2.57	21
119	02.12.2011	00:24:02.64	42.52	76.26	00.10	10.72	03.73	5.62	3.77	2.77	471	2.36	11
120	16.12.2011	03:14:40.13	42.30	75.88	13.20	10.20	03.44	0.97	3.26	6.07	215	4.28	8
121	24.12.2011	09:20:07.10	41.64	73.19	11.20	11.96	04.42	21.0	4.15	2.77	471	8.80	12
122	05.02.2012	07:10:18.06	41.57	74.79	17.10	12.79	04.88	142.0	4.71	1.16	1124	4.39	21
123	10.02.2012	06:49:17.11	42.94	74.57	15.80	10.15	03.42	0.42	3.02	7.95	164	4.12	9
124	19.02.2012	05:23:03.04	43.66	76.64	02.50	09.80	03.22	2.13	3.49	3.34	390	1.57	8
125	20.02.2012	02:23:56.17	41.48	73.13	00.00	10.80	03.78	66.0	4.48	2.55	511	21.61	15
126	20.02.2012	04:18:07.52	41.32	72.85	00.10	09.57	03.09	21.3	4.16	2.77	471	8.93	16
127	28.03.2012	12:54:01.43	42.49	74.73	16.80	10.42	03.57	0.51	3.08	7.33	178	3.97	14
128	16.05.2012	03:26:40.57	42.48	74.92	15.90	10.63	03.68	0.41	3.01	5.30	246	1.19	12
129	27.08.2012	00:24:59.09	41.32	75.53	03.10	10.08	03.38	4.00	3.67	5.90	221	16.24	11
130	29.09.2012	21:35:04.01	41.69	73.04	09.10	10.21	03.45	2.04	3.48	1.95	668	0.30	15
131	14.10.2012	16:30:08.24	40.90	74.14	00.00	10.36	03.53	21.5	4.16	1.61	810	1.77	8
132	15.11.2012	16:07:43.48	41.65	74.58	18.10	09.80	03.22	6.51	3.81	3.93	332	7.80	5
133	28.11.2012	05:30:08.53	41.89	77.70	00.30	11.62	04.23	17.6	4.10	2.00	652	2.78	7
134	29.11.2012	18:18:46.58	40.95	74.84	00.00	09.64	03.13	5.82	3.78	5.16	253	15.80	6
135	04.04.2013	16:07:21.72	42.62	75.54	20.30	10.37	03.54	0.32	2.94	6.95	188	2.15	5
136	02.05.2013	04:52:25.03	42.20	73.63	06.20	10.59	03.66	3.41	3.63	2.55	511	1.12	14
137	06.06.2013	03:03:07.42	42.27	76.43	23.30	10.25	03.47	0.66	3.15	6.76	193	4.05	12
138	24.06.2013	00:59:55.09	42.15	76.10	14.40	09.99	03.33	0.36	2.97	7.74	168	3.27	6
139	15.07.2013	18:19:08.03	42.49	74.89	14.20	10.47	03.59	0.33	2.95	8.17	160	3.58	9
140	25.07.2013	03:39:16.67	41.37	75.72	08.90	10.44	03.58	1.02	3.28	8.17	160	11.01	22
141	20.09.2013	16:28:25.99	42.34	76.50	06.80	11.46	04.14	15.4	4.06	5.16	253	41.90	11
142	21.09.2013	04:03:34.86	41.95	76.15	03.00	09.59	03.11	0.69	3.16	4.15	314	0.97	5
143	17.10.2013	06:19:21.09	42.63	74.98	09.30	10.59	03.66	0.49	3.06	7.53	173	4.11	7
144	23.11.2013	09:42:06.75	42.43	75.69	09.90	13.46	05.26	101.0	4.61	3.34	390	74.12	8
145	21.01.2014	20:46:36.20	42.11	75.14	14.70	12.33	04.63	13.8	4.03	3.73	349	14.16	14
146	14.02.2014	18:43:03.71	42.30	76.01	15.90	10.07	03.37	0.73	3.18	4.04	323	0.95	6
147	22.02.2014	04:24:12.46	41.47	74.65	00.00	47.20	24.00	1.10	3.30	2.77	471	0.46	6
148	27.04.2014	14:04:51.57	41.84	72.80	00.10	09.09	02.83	0.63	3.13	5.30	246	1.84	6
149	13.05.2014	01:18:44.89	42.27	75.05	06.70	11.02	03.90	2.99	3.59	4.38	298	4.96	13
150	28.05.2014	02:25:58.35	42.49	74.80	12.10	11.88	04.38	4.10	3.68	4.27	305	6.30	15

Note. φ – latitude, λ – longitude, H – depth, K – class, M – magnitude, f_0 – corner frequency, M_0 – scalar seismic moment, r – source radius, $\Delta \sigma$ – stress drop, N_{obs} – number of seismograms, on the which base the seismic moment tensor is obtained.

Примечание. φ – широта, λ – долгота, H – глубина, K – класс, M – магнитуда, f_0 – угловая частота, M_0 – скалярный сейсмический момент, r – радиус очага, $\Delta \sigma$ – сброс напряжений, N_{obs} – количество сейсмограмм, на основе которых получен тензор сейсмического момента

References

1. 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

2. 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

3. Brune J.N. 1971. Corrections. J. of Geophysical Research, 76: 5002.

4. Chelidze T. et al. (eds) **2018**. *Complexity of seismic time series: Measurement and application*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 548 p. https://doi.org/10.1016/c2016-0-04546-1

5. Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J. H. **1981**. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4): 2825–2852. https://doi.org/10.1029/jb086ib04p02825

6. 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

7. Filin A.P. 1975. [Applied mechanics of deformable solids], vol. 1. Moscow: Nauka, 832 p. (In Russ.).

8. Fukahata Yu., Yagi Y., Matsu'ura M. **2003**. Waveform inversion for seismic source processes using ABIC with two sorts of prior constraints: Comparison between proper and improper formulations. *Geophysical Research Letters*, 30. https://doi.org/10.1029/2002gl016293

9. *Geologicheskaia karta Kirgizskoi SSR* [*Geological map of the Kyrgyz SSR*]. **1980**. [On a scale 1 : 500 000]. Ed.-in-Chief S.A. Igemberdiev. Leningrad: MinGeo USSR, 6 sheets. (In Russ.).

10. Kanamori H. **1977**. The energy release in great earthquakes. J. of Geophysical Research, 82(20): 2981–2987. https://doi.org/10.1029/jb082i020p02981

11. Kikuchi M., Kanamori H. **1991**. Inversion of complex body waves-III. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(6): 2335–2350.

12. Kocharyan G.G. **2016**. *Geomekhanika razlomov* [*Geomechanics of faults*]. Moscow: GEOS, 424 p. (In Russ.).

13. Kohketsu K. **1985**. The extended reflectivity method for synthetic nearfield seismograms. J. of Physics of the Earth, 33: 121–131. https://doi.org/10.4294/jpe1952.33.121

14. Kostyuk A.D. **2008**. [The mechanisms of earthquakes sources of intermediate intensity at the Northern Tien Shan]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo Slavianskogo universiteta* [*Vestnik of the Kyrgyz-Russian Slavic University*], 8(1): 100–105. (In Russ.).

15. Kostyuk A.D., Sycheva N.A., Yunga S.L., Bogomolov L.M., Yagi Y. **2010**. Deformation of the Earth's crust in the Northern Tien Shan according to the earthquake focal data and satellite geodesy. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 46(3): 230–243.

16. Krestnikov V.N., Shishkin E.I., Shtange D.V., Yunga S.L. **1987**. [Stressed state of the Earth crust of the Central and Northern Tien Shan]. *Izv. AN SSSR, Fizika Zemli = Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 3: 13–30. (In Russ.).

17. Kurskeev A.K. **2004**. Zemletriaseniia i seismicheskaia bezopasnost' Kazakhstana [Earthquakes and seismic safety of Kazakhstan]. Almaty: Evero, 501 p. (In Russ.).

18. Kurskeev A.K., Belosliudtsev O.M., Zhdanovich A.R., Serazetdinova B.Z., Stepanov B.S., Uzbekov N.B. **2004**. *Seismologicheskaia opasnost' orogenov Kazakhstana* [Seismic hazard for the orogens of Kazakhstan]. Almaty: Evero, 294 p. (In Russ.).

19. Lay T., Wallace T. (eds) **1995**. *Modern global seismology*. San-Diego: Academic Press, 517 p. (International Geophysics; 58).

20. 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

21. Puzyrev N.N. **1997**. [*Methods and objects of seismic research*]. Novosibirsk: SO RAN Publ.: NITsOIGGM, 300 p. (In Russ.).

22. Rautian T.G. **1960**. [The energy of earthquakes]. *Metody detal 'nogo izucheniia seismichnosti* [*Methods of detailed study of seismicity*]. Moscow: USSR Acad. of Sci. Publ., 176: 75–114. (In Russ.).

23. Riznichenko Iu.V. **1985**. [Problems of seismology]. In.: *Izbrannye trudy* [Selected works]. Moscow: Nauka, 408 p. (In Russ.).

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

25. 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 26. Sim L.A., Marinin A.V., Sycheva N.A., Sychev V.N. **2014**. The pattern of the paleo- and present-day stresses of Northern Tien Shan. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 50(3): 378–392.

https://doi.org/10.1134/S1069351314030100

27.Snoke J.A. **1989**. Earthquake mechanisms. In: *Encyclopedia of geophysics*. Van Nostrand Reinhold Company, 239–245. https://doi.org/10.1007/0-387-30752-4_2

28. Snoke J.A. **1990.** Clyde and the gopher: a preliminary analysis of the 12 May 1990 Sakhalin Island event. *Seismological Research Letters*, 61: 161.

29. Snoke J.A. 2000. FOCMEC: FOCal MEChanism determinations: A manual.

URL: www.geol.vt.edu/outreach/vtso/focmec/ (access date: 10.04.2020).

30. Sychev I.V., Koulakov I., Sycheva N.A., Koptev A., Medved I., Khrepy S.E., Al-Arifi N. **2018.** Collisional processes in the crust of the Northern Tien Shan inferred from velocity and attenuation tomography studies. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(2): 1752–1769. https://doi.org/10.1002/2017JB014826

31. Sychev V.N., Sycheva N.A. **2018**. Programmnyi kompleks CodaQ rascheta dobrotnosti sredy na osnove modeli odnokratnogo rasseianiia [The CodaQ software complex for the Q-factor calculating on the base of single scattering model]: [authorship certificate 2018610919 (KG); Research Station RAS in Bishkek city. no. 2017614787]; application 25.05.2017; publ. 19.01.2018. (In Russ.).

32. Sychev V.N., Sycheva N.A., Imashev S.A. **2019**. Study of aftershock sequence of Suusamyr earthquake. *Geosistemy perekhodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 3(1): 35–43. (In Russ.). doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.035-043

33. 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*, vol. 50 (3): 415–426. https://doi.org/10.1134/s1069351314030112

34. 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

35. 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

36. Reasenberg P.A., Oppenheimer D. **1985.** FPFIT, FPPLOT and FPPAGE: FORTRAN Computer Programs for Calculating and Displaying Earthquake Fault-Plane Solutions. *US Geological Survey Open-File Report*, 85–739. 109 p.

37. 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

38. 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

39. Tsallis C. **1988**. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. *J. of Statistical Physics*, 52(1–2): 479–487. https://doi.org/10.1007/bf01016429

40. Yagi Yu. **2004.** *Determination of focal mechanism by moment tensor inversion*. Tsukuba: IISEE Lecture Note, 51 p.

41. Yunga S.L. **1990**. [*Methods and results of study of seismotectonic deformations*]. Moscow: Nauka, 191 p. (In Russ.).

42. Zemnaia kora i verkhniaia mantiia Tian'-Shania v sviazi s geodinamikoi i seismichnost'iu [The Earth crust and upper mantle of the Tien Shan in connection with geodynamics and seismicity]. 2006. Ed. A.B. Ba-kirov. Bishkek: Ilim, 116 p. (In Russ.).

About the Author

SYCHEVA Nailia Abdullovna (ORCID 0000-0003-0386-3752), Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher, the GPS laboratory, Research Station of the RAS in Bishkek city, Kyrgyzstan, nelya@gdirc.ru

УДК 551.248.2,551.89

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.210-219.220-229

Гидроизостазия как фактор, повлиявший на ход послеледниковой трансгрессии на шельфе и побережье Приморья, по результатам численного моделирования

© 2020 Р. Ф. Булгаков¹, В. В. Афанасьев¹, Е. И. Игнатов²

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия ²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия *E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

Резюме. В статье рассматриваются факторы, влияющие на ход послеледниковой трансгрессии на Приморском побережье (территории нынешнего Приморского края) и шельфе Дальнего Востока России. Особенностью этого региона оказалось заметное отставание наступления моря в начале голоцена, после завершения холодного стадиала позднего дриаса. Причиной этого ряд авторов считает нисходящий характер тектонических движений, доминирующий в этом регионе на протяжении всего кайнозоя. Однако обнаруженные поднятые следы древних береговых линий в период климатического оптимума голоцена противоречат выводу о равномерном тектоническом опускании. Предложено объяснение данного противоречия компенсацией гидроизостатической нагрузки за счет упруго-вязких свойств мантийных слоев после завершения таяния ледников последнего оледенения с поступлением больших объемов воды в бассейн Японского моря. Доминирующие нисходящие тектонические движения западного борта Японского моря и Приморского побережья прервались гидроизостатически обусловленным воздыманием в атлантическое время 5-6 тыс. л.н. Численные расчеты послеледниковой трансгрессии в программах SELEN 2.9 и SELEN 4 показали, что гидроизостатическое влияние при увеличении значений вязкости мантийных слоев ведет к замедлению трансгрессии. Реологические характеристики мантийных слоев в районе Приморского побережья имеют более низкие значения в сравнении с Японскими островами, расположенными ближе к зоне современной субдукции.

Ключевые слова: послеледниковая трансгрессия, вязкость мантии, гидроизостазия, вертикальные движения, Приморье Дальнего Востока.

Для цитирования: Булгаков Р.Ф., Афанасьев В.В., Игнатов Е.И. Гидроизостазия как фактор, повлиявший на ход послеледниковой трансгрессии на шельфе и побережье Приморья, по результатам численного моделирования. *Геосистемы переходных зон*, 2020, Т. 4, № 2. с. 210–219. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.210-219.220-229

Effect of hydroisostasy on postglacial transgression on the shelf and coast of Primorye as revealed by computer modelling

Rustam F. Bulgakov^{*1}, Victor V. Afanas'ev¹, Evgeniy I. Ignatov²

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia ²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

Abstract. Factors affecting the process of postglacial transgression on the shelf and coast of the Primorye (the territory of modern Primorsky Kray) in the Russian Far East are considered. The main regional feature consists in a significant lag of the sea level rise at the beginning of the Holocene following the completion of the Younger Dryas cold stadial. While some researchers explain this phenomenon in terms of descending tectonic movements that predominated in this region over the course of the Cenozoic era, traces of the Holo-

cene climatic optimum sea level highstands along the coastline contradict the conclusion that tectonic submergence was uniform. In order to explain this contradiction, the hypothesis of hydroisostatic load compensation due to the viscoelastic properties of the mantle layers following the end of the last period of glaciation and involving the influx of huge volumes of water to the basin of the Sea of Japan is proposed. Dominating tectonic submergences of the western rim of the Sea of Japan and the Primorye coast were interrupted by hydroisostatic emergence during the Atlantic period between 5–6 ka BP. The use of a computer simulation of postglacial transgression in the SELEN 2.9 and SELEN 4.0 software environments demonstrates a transgression lag under hydroisostatic influence along with the increasing viscosity of mantle layers. The viscosity of mantle layers in the Primorye region is shown to be lower than for the Japanese Archipelago, which is located closer to the recent subduction zone.

Keywords: postglacial transgression, mantle viscosity, hydroisostasy, vertical movements, Primorye, Russian Far East.

For citation: 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. *Geosistemy perekhodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 220–229. (In Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.210-219.220-229

Введение

Послеледниковая трансгрессия в Приморском районе российского Дальнего Востока проходила с заметным отставанием от трансгрессии, обусловленной только эвстатическим фактором, при этом вдоль всего побережья отмечаются поднятые выше современного уровня моря следы древних береговых линий. По данным [Park et al., 2000; Плетнев, 2012], Японское море даже в максимум последнего оледенения не теряло связь с океаном, поэтому перерывов в поступлении водных масс в результате изоляции Японского моря от Мирового океана не происходило и на отставание хода трансгрессии они не влияли.

Для выявления факторов, влияющих на ход трансгрессии, нами предпринято моделирование изменений уровня моря в результате таяния ледников в зависимости от реологических параметров мантийных слоев. Моделирование, выполненное в программных пакетах SELEN 2.9 и SELEN 4.0, показало существенное влияние эффекта гидроизостазии на ход трансгрессии.

Программные пакеты SELEN 2.9 и SELEN 4.0, предназначенные для решения уравнения изменения уровня моря с учетом гляцио- и гидроизостатической коррекции, разработаны и представлены в открытом доступе коллективом авторов под руководством Г. Спада [Spada, Stocchi, 2006; Spada, Stocchi, 2007; Spada et al., 2012; Spada, Melini, 2019]. В работе при анализе литературных данных об изменениях уровня моря, полученных в результате полевых исследований предшественниками, учитывались реконструкции высотного положения и возраста древних следов моря, выполненные методами микропалеонтологического анализа и подтвержденные абсолютными определениями возраста. Качество данных позволяет использовать их как опорные отметки для моделирования кривой послеледниковой трансгрессии уровня моря и оценок вклада эвстатической трансгрессии и тектонических движений.

Изменение уровня моря в Приморье по результатам полевых наблюдений

Короткий с соавторами [Короткий и др., 1980] отмечают, что вследствие кайнозойского погружения прибрежной полосы Приморья и уничтожения древних береговых линий определение плейстоценовых этапов развития побережья весьма затруднительно. На шельфе Приморья обнаружено несколько подводных абразионных террас на глубинах 20, 30–40, 100–120 м, возраст которых, однако, неизвестен. Они могут датироваться ранним, или средним, или поздним плейстоценом, а могут фиксировать стадии послеледниковой трансгрессии.

Несомненно, что в течение плейстоцена на шельфе Приморья несколько раз сменялись трансгрессивные и регрессивные режимы.

Трансгрессии и регрессии, видимо, были синхронны общепланетарным гляциоэвстатическим колебаниям уровня Мирового океана. Однако достоверных следов этих изменений уровня моря практически не обнаружено. На шельфе они, вероятно, размыты, так как при бурении под слоем прибрежно-морских голоценовых и верхнеплейстоценовых отложений чаще всего вскрываются отложения неогена и более древних эпох.

На побережье следов межледниковых трансгрессий также не обнаружено. Исключением являются найденные в нескольких бухтах морские отложения, залегающие на уровне, близком современному. Они представлены береговыми и лагунными отложениями с комплексами сублиторальных и лагунных диатомей и пыльцой теплолюбивых растений. Возраста этих отложений авторы [Короткий и др., 1980] не указывают даже предположительно.

В начале голоцена поведение кривой уровня моря Короткий и др. [1980] характеризуют следующим образом: «В амурскую (пребореальную) фазу береговая линия Японского моря располагается на отметках (-50... -70) м. Осадки, отвечающие проникновению морских вод в переуглубленные долины рек Туманная, Раздольная, Киевка, вскрыты на глубинах (-48.7) и (-43) м. Наиболее достоверно положение уровня моря в пребореале определено в скв. 2 в Амурском заливе, где фациальная граница, отделяющая континентальные отложения от морских, проходит на отметке (-42.9) м» [Короткий и др., 1980, с. 183].

Таким образом, в начале голоцена заметных отставаний от характерной для эвстатической кривой трансгрессии уровня моря еще не отмечено.

Но позже, по окончании позднего дриаса, в период импульса поступления талой воды MWP-1B (melt water pulse-1B) [Peltier, Fairbanks, 2006; Tanabe et al., 2010], приведшего к ускорению послеледниковой трансгрессии, на приморском шельфе уже фиксируются отставания в ходе трансгрессии.

Так, в среднем Приморье, несмотря на редкую встречаемость голоценовых и верхнеплейстоценовых отложений на шельфе Приморья, описан [Кузьмина и др., 1987] такой разрез, удачно вскрытый скважинами в бухте Киевка, на глубине моря 16-35 м. Предложено принять его как стратотип голоцена морских осадков Приморья. Авторы [Кузьмина и др., 1987] считают, что скважина располагается в относительно тектонически стабильном, по [Кулаков, 1973], районе, хотя свидетельствуют, что этот район приурочен к Центрально-Сихотэ-Алиньскому тектоническому шву. В разрезе отмечается непрерывное осадконакопление с сартанского похолодания – временной интервал осадков 20-25 тыс. л.н. Разрез палеонтологически охарактеризован и датирован радиоуглеродным методом.

В скважине № 132, пробуренной на шельфе, на глубине 20 м получены датировки прибрежных осадков возрастом 9660 ± 160 лет (МГУ-822), которые, как считают [Кузьмина и др., 1987], сформировались на отметках чуть ниже 48–49 м от современного уровня моря и по своему фациальному составу свидетельствуют о положении уровня моря в это время.

По результатам палинологического анализа датированный слой характеризуется резким потеплением климата, что может являться свидетельством продолжения импульса поступления талой воды MWP-1B – события, сменившего поздний дриас, как это было обнаружено на о. Барбадос [Peltier, Fairbanks, 2006; Тапаbe et al., 2010]. Формировался слой в обстановке окислительного и активного гидродинамического режима [Кузьмина и др., 1987].

П.А. Каплин [Каплин, 1978], проанализировав результаты работ лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена МГУ на Японском море и обобщив имеющиеся литературные сведения, пришел к выводу, что на шельфе Приморья выявлены три комплекса следов древних береговых линий. Два представлены аккумулятивными формами на глубинах 45–50 и 35–40 м с возрастом более 40 тыс. л.н. и один на глубинах 20–25 м с возрастом 7–8 тыс. л.н.

Следы древней береговой линии возрастом 7–8 тыс. л.н. обнаружены на глубинах 20–25 м, в то время как на других побере-

жьях, в том числе на расположенном не так далеко о. Окинава, следы береговых линий этого возраста находятся на глубинах 10–15 м [Evelpidou et al., 2019]. Это также подтверждает факт отставания хода послеледниковой трансгрессии на приморском шельфе.

Другой характерной особенностью послеледниковой трансгрессии на побережье Приморья является превышение современного уровня моря в оптимум голоцена. Аккумулятивные формы рельефа голоценового возраста, располагающиеся выше современного уровня моря, часто состоят из нескольких генераций береговых валов.

Например, в бухте Рудная выделяются три такие генерации, их высота от берега вглубь суши 2, 3–4 и 5–6 м. Они разделены заболоченными понижениями – бывшими лагунами. Аккумулятивные формы сложены толщей песчано-гравийных отложений, включающих линзы ила. По отложениям аккумулятивных форм получено большое количество радиоуглеродных дат в диапазоне от 5.5 до 1 тыс. л.н. [Игнатов, 2004].

В атлантическое время Кузьмина и др. [1982] определяют подъем уровня моря выше современного на 2–3 м. Они полагают, что в это время формировались (2.5–3)-метровая морская терраса и основание 3.5-метровой лагунной террасы побережья. Позже, в начале суббореала, произошла небольшая регрессия моря, подтвержденная находками археологических стоянок: стоянки обнаружены на абразионной поверхности высотой 4.5 м, сразу после выхода ее из волноприбойной зоны.

Для среднеголоценового времени (атлантического), барабашевской эпохи, авторы [Короткий и др., 1980] выделяют поднятую голоценовую террасу практически по всему материковому побережью Японского моря. В юго-западном Приморье она представлена обширной низменной равниной Хасанского взморья, которая далее к северо-востоку отмечается в устьях рек и изголовьях бухт. Ее высота колеблется в пределах 4–8 м. За зоной древних штормовых валов выделяется аллювиально-лагунная терраса высотой 3–4 м. Амплитуда относительных поднятий прибрежной суши оценивается неоднозначно: 2–3, 5–8 и 11–13 м. Поэтому в качестве репера для отсчета предельных колебаний уровня Японского моря в среднем голоцене предлагают использовать высотные отметки кровли лагунных слоев в разрезе 3–4-метровой террасы [Короткий и др., 1980].

Возраст пачки лагунных отложений в разрезе 3–4-метровой террасы колеблется от 736 \pm 160 лет (МГУ-ИОАН-229) в устье р. Барабашевка до 4500–5000 лет в устье р. Черная. Эти лагунные отложения хорошо коррелируют с накоплениями пляжевых отложений в разрезе 5-метровой морской террасы, радиоуглеродные датировки которых 5530 \pm 110 лет (ГИН-738), 5630 \pm 110 лет (ГИН-739а), 6000 \pm 130 лет (ГИН-739б) [Короткий и др., 1980].

Далее, в амбинскую (суббореал) фазу, выделяется понижение относительно максимума атлантика на 2.5–3.0 м [Короткий и др., 1980].

Во второй половине суббореала, в период потепления климата, отмечается вновь подъем уровня моря, подтвержденный поселениями древних людей на структурно-денудационных поверхностях высотой 20–40 м [Селиванов, Степанов, 1982].

В субатлантике море регрессирует, древние поселения людей (янковская культура, 2500-2000 л.н.) найдены не только на высоте 4-5 м, но и на современном уровне моря. В субатлантике-2 (SAT2) на 2.5-метровой морской аккумулятивной террасе датированы моллюски 1420 ± 18 (МГУ-758) и 1400 ± 200 лет (МГУ-810), что говорит о трансгрессии Японского моря. Археологические данные свидетельствуют о погребении артефактов янковской культуры в пляжном песке и гальке прибрежных валов высотой 4.2 м [Селиванов, Степанов, 1982].

Таким образом, общей особенностью хода послеледниковой трансгрессии в Приморье в начале голоцена, после завершения холодного стадиала – позднего дриаса, является отставание от эвстатической трансгрессии [Каплин, 1978; Короткий и др., 1980; Кузьмина и др., 1987]. При этом отставание подъема уровня моря продолжается и после того, как скорость поступления талой воды вновь увеличилась.

Другой характерной особенностью послеледниковой трансгрессии в Приморье
является превышение современного уровня моря в атлантическое время с последующим плавным спадом, сопровождаемым осцилляциями регрессий и трансгрессий с амплитудами в первые метры.

Характер хода трансгрессии/ингрессии Японского моря по речным долинам и риасовый тип побережья Приморья подтверждают преобладание отрицательных тектонических вертикальных движений в этом регионе. Но повсеместное распространение поднятых береговых линий атлантического времени свидетельствует о чередовании нисходящих тектонических движений с воздыманиями.

Вывод о прерывистых, импульсных тектонических движениях, характерных в целом для региона, не противоречит результатам анализа сейсморазрезов [Антипов, 1987], которые показывают, что япономорский глубоководный бассейн был создан двумя импульсами дифференцированных кратковременных опусканий: предсреднемиоценовым и позднечетвертичным. Для бортов Японского моря характерны «флексурно-разрывные» зоны [Антипов, 1987], по которым происходили тектонические движения.

Моделирование послеледниковой кривой изменения уровня моря для Приморья

С использованием пакета программ с открытым кодом SELEN 2.9 в работе выполнены расчеты с целью получить кривые послеледникового изменения уровня моря для района побережья Приморья.

Программный пакет SELEN 2.9 предназначен для решения так называемого уравнения уровня моря (SLE — sea level equation) [Spada, Stocchi, 2006]. Решение «уравнения уровня моря» находится в области значений пространственно-временной изменчивости рельефа дна Мирового океана при сохранении гравитационного потенциала морской поверхности, постоянной для конкретно взятого сценария таяния покровных ледников ледниковой эпохи и вязко-эластичной модели Земли [Wu, Peltier,1983]. Программный пакет реализует основополагающие принципы, предложенные [Farrel, Clark, 1976] для расчета изменений уровня моря после перераспределения талой воды из ледников по поверхности вязко-эластичной модели Земли.

Расчеты сделаны для разных реологических характеристик слоев мантии Земли и при разных сценариях таяния ледников. Дополнительно в тестовом режиме провели моделирование с помощью последней версии пакета программ SELEN 4 [Spada, Melini, 2019]. Новая версия программы отличается от предыдущей SELEN 2.9 такими обновлениями, как учет вращения Земли, изменения конфигурации суши и океана по мере повышения уровня Мирового океана вследствие таяния позднеплейстоценовых ледников, сдвиг полюса по мере деградации ледников. Для моделирования таяния ледников в SELEN 4 используется обновленная версия модели позднеплейстоценового оледенения ICE6gC с реологической моделью мантии VM5a [Peltier et al., 2015]. Следует заметить, что пока не получилось добиться устойчивых результатов в программном пакете SELEN 4, поэтому приводится только один расчет.

В таблице приведены значения вязкости мантийных слоев, использованные [Nakada et al., 1991] для оценки мантийной реологии Японских островов и взятые нами для расчетов. Он предложил 3 типа вязкостной характеристики мантийных слоев Земли: А, В и С. Четвертый тип D, с предельными для мантийных слоев значениями вязкости, добавлен нами в качестве «наиболее вязкого» [Булгаков и др., 2020]. Названия моделей в таблице состоят из обозначения модели сценария послеледникового таяния – ICE3g [Tushingham, Peltier, 1991] и ICE5g [Peltier, 2004], с добавлением символа, указывающего на тип вязкостной характеристики мантийных слоев Земли.

Таким образом, к примеру, обозначение ICE5gA говорит, что при расчете использовалась модель таяния ледников ICE5g по [Peltier, 2004] с вязкостной моделью типа A по [Nakada et al., 1991].

В результате расчетов были получены кривые изменения уровня моря послеледниковья для всех перечисленных вязкостных характеристик и моделей сценариев таяния ледников последнего оледенения. На рис. 1 представлены полученные кривые для точки местонахождения г. Находка. Обозначения

Слой	Модель						
	ICE3gD	ICE3gB	ICE5gA	ICE5gB	ICE5gC	ICE5gD	SELEN 4
Литосфера, вязкость	∞, 55	∞, 30	∞, 50	∞, 30	∞, 30	∞, 55	∞, 90
и толщина, км							
Верхняя мантия							
слой 1	1022				$2 \cdot 10^{19}$	1022	5·10 ²⁰
слой 2	1022	$2 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$	1022	5·10 ²⁰
Транзитный слой,	1022				$2 \cdot 10^{20}$	1022	5·10 ²⁰
400–670 км							
Нижняя мантия							
слой 1	1023				1022	1023	1.5.1021
слой 2	1023				1022	1023	3.2.1021
слой 3	1023	1022	1022	1022	1022	1023	3.2.1021
слой 4							3.2.1021
слой 5	1023				1022	1023	3.2.1021
слой 6]						3.2.1021
Ядро	- x	x	x	x	x	x	- x

Таблииа.	Вязкостные ха	рактеристики	і мантийных	слоев, Па∙с

Примечание. Объяснения к обозначениям моделей даны в тексте.

кривых соответствуют обозначениям моделей в таблице.

Схожие результаты расчетов хода послеледниковой трансгрессии получили [Evelpidou et al., 2019] в программном пакете SELEN с моделями ICE6g и VM5a для сравнительно близкого к Приморью региона, о. Окинава архипелага Рюкю. Результаты расчетов использовались при уточнении полевых данных, свидетельствующих о превышении уровня моря в оптимум голоцена в районе архипелага Рюкю.

Обсуждение

Р. Pirazzoli [Pirazzoli, 2005], сравнив результаты численного моделирования голоценовой трангрессии, выполненного разными авторами для нескольких моделей хода таяния ледников, с данными полевых наблюдений в Средиземном море, пришел к выводу, что в одних случаях результаты расчетов превышают и опережают оценки, полученные при полевых наблюдениях на побережьях, а в других отстают от них. Анализ, выполненный [Pirazzoli, 2005], показывает, что



Рис. 1. Кривые послеледниковой трансгрессии в районе г. Находка.

численные методы пока не могут в точности воспроизводить ход трансгрессии во всех регионах Мирового океана.

Надо оговориться, что эта ситуация сохраняется до сих пор, несмотря на значительное совершенствование как методик расчетов, так и моделей хода таяния ледников. В настоящей работе расчеты используются в большей мере для оценки тенденций, чем для получения точных значений высоты морских палеоуровней.

Из результатов полевых работ, представленных выше, наиболее надежной выглядит оценка уровня Японского моря, определенная по скв. 132 с возрастом 9.6 тыс. л.н. на глубинах около –48... –49 м [Кузьмина и др., 1987], которая свидетельствует об экстремально низком уровне моря этого времени. Оценка для хронологически последующего положения уровня Японского моря на глубинах 20–25 м в интервале времени 7–8 тыс. л.н. [Каплин, 1978] подтверждает вывод о замедлении трансгрессии и расширяет временной интервал, на котором фиксируется это замедление.

Если значение уровня моря 9.6 тыс. л.н. (рис. 1) сравнить с уровнем моря, полученным по результатам исследования скважины № 132, видно, что наиболее близка к этим результатам кривая ICE3gD (рис. 1, линия оранжевого цвета), для которой уровень моря близок к –37 м. Такая же тенденция – наибольшая близость к наблюденным значениям – видна для интервала времени 7–8 тыс. л.н., когда уровень моря по наблюдениям находился на глубине 20–25 м, а на кривой ICE3gD – на глубине 10–19 м.

Для модели ICE3gD, как следует из ее обозначения, при расчете использовалась модель послеледникового таяния ICE3g. Эквивалентная кривая изменений уровня моря для модели приведена на рис. 2 а. Согласно этой кривой, общий объем воды, поступившей в океан за 22 тыс. лет, эквивалентен повышению уровня моря на 113.49 м, что меньше величины, рассчитанной за тот же период времени для скорректированной модели ICE5g, – 127.11 м. Разница между кривыми двух моделей особенно значима для отрезка времени от 6 до 22 тыс. л.н. Не вдаваясь в анализ причин, просто учтем, что ско-

рость трансгрессии в интервале времени от 6 до 22 тыс. л.н. на кривой модели ICE3g ниже, чем на последующей версии ICE5g.

С одной стороны, скорость трансгрессии за счет поступления воды в районе Приморья оказалась сниженной, хотя на многих побережьях этого времени отмечается импульс ускорения поступления воды от таяния ледников – MWP-1B [Lambeck et al., 2014]. И нужно учитывать, что изоляции Японского моря от Мирового океана не происходило, перерывов в поступлении водных масс в Японское море не было и на ход трансгрессии они, по данным [Park et al., 2000; Плетнев, 2012], не влияли.

С другой стороны, тип D вязкостной характеристики мантийных слоев имеет наиболее высокие значения вязкости (см. таблицу), при которых полученные расчетные кривые изменения уровня моря демонстрируют наибольшее запаздывание трансгрессии.

Если проанализировать кривые по другим расчетным моделям, то выделяется общая тенденция: чем выше «вязкость» мантийных слоев модели, тем медленнее трансгрессия и ниже одновозрастные уровни моря. Это характерно для обеих моделей хода таяния ледников.

На моделях с низкими значениями вязкости, как, например, ICE5gC, скорость трансгрессии наиболее высокая и среднеголоценовые превышения наиболее значительны. Надо заметить, что наибольшие превышения в середине голоцена получились на кривой SELEN 4, которая выполнялась по усовершенствованному сценарию таяния ледников ICE6g и мантийной модели с низкими значениями вязкости.

В отношении среднеголоценовой трансгрессии, которая совпадает с климатическим оптимумом голоцена и зафиксирована на многих побережьях Мирового океана, следует обратить внимание, что в моделях таяния ледников (рис. 2 a, b) никак не учитываются климатические осцилляции, которые повсеместно зафиксированы как биостратиграфическими методами, так и по изменению соотношений изотопов кислорода [Каплин, 1978]. То есть для образования следов превышения современного уровня моря в атлантический климатический оптимум голоцена



Рис. 2. Эквивалентные кривые изменения уровня моря (ESL) для модели ICE3g (a) и модели ICE5g (b). ka – 10³ лет.

не требуется дополнительный объем талой воды из ледников, а достаточно релаксации литосферы и мантии после гидроизостатического нагружения [Lambeck et al., 2014].

Если такой механизм объясняет среднеголоценовое превышение современного уровня, то будет допустимо не исключать подобный вклад гидроизостатической релаксации и в отношении последующих колебаний уровня моря, наблюденных на побережьях Приморья. Это регрессия в суббореале (4 тыс. л.н.), небольшая трансгрессия в конце суббореала, регрессия в субатлантике (2–2.5 тыс. л.н.) и трансгрессия в субатлантике-2 (1.4 тыс. л.н.).

В подтверждение идеи том, что ведущую роль в колебаниях уровня моря после окончания таяния ледников играли вертикальные движения земной коры в результате гидроизостатической релаксации, можно привести результаты, полученные на о. Хонсю, где одновозрастный уровень среднеголоценового превышения уровня моря в разных точках острова меняется от полного отсутствия до нескольких метров выше современного уровня моря [Nakada et al., 1991], чего нельзя было бы ожидать при осцилляции поступления талой воды.

За пределами обсуждений в этой статье, как предмет отдельного изучения, остается вопрос о вкладе гидроизостатического нагружения талой водой ледников последнего покровного оледенения чаши Японского моря, как усилителя и ускорителя нисходящих тектонических движений, характерных для Приморья в течение всего кайнозоя.

Среди вязкостных моделей типов А, В, С, заимствованных из использованных для Японских островов [Nakada et al., 1991], наиболее высокое среднеголоценовое превышение уровня моря при расчетах дали модели с пониженной вязкостью типа С, в которых современный уровень достигнут около 8 тыс. л.н. И наоборот, среднеголоценового превышения современного уровня моря не показали модели с наибольшими значениями вязкости типа D.

Реологические характеристики мантийных слоев в районе Приморья, скорее всего, ближе к моделям типа А и В. На модели типа В нет такой излишне высокой скорости трансгрессии, как на модели типа С, но превышение современного уровня в середине голоцена все-таки отмечается. Кривая, полученная по модели типа А, очень похожа на кривую типа В, но при этом имеет мощность литосферы 50 км, что ближе к данным, полученным геофизическими методами [Родников и др., 2005]. Неполное соответствие полевым наблюдениям объясняется несовершенством моделей хода таяния ледников.

Полученные на кривых особенности поведения уровня моря в послеледниковую трансгрессию позволяют предположить, что мантийные слои в районе Приморья более «вязкие» сравнительно с районом Японских островов.

На восточном борту Японского моря, на равнине Ичиго (Этиго) о. Хонсю, после детального изучения кернов скважин [Tanabe et al., 2010] установили в интервале времени 9.9–9.7 тыс. л.н. ускорение трансгрессии, которое описывают как уникальное явление, присущее только этому побережью Японского моря и не встречающееся в других районах Мирового океана. Связывают это ускорение с косейсмическими тектоническими погружениями по активному разлому, ограничивающему равнину Ичиго с запада. При этом уровень моря в этом районе, после учета вклада сейсмотектоники, для возраста 9.6 тыс. л.н. оценивают на уровне –33.5 м [Тапаbe et al., 2010] (для сравнения, в Приморье чуть выше –48... –49 м).

Учитывая, что результаты моделирования показали для Приморья приближение к отметкам, полученным при полевых наблюдениях, но все-таки не достигли этих отметок, можно предположить, что в задержку послеледниковой трансгрессии внесли свой вклад косейсмические тектонические опускания побережья и шельфа Приморья по аналогии с о. Хонсю. Хотя активных голоценовых разломов вдоль побережья Приморья пока не выявлено, сейсмотектонические просадки побережья и шельфа могли происходить по «флексурно-разрывным зонам» (по [Антипов, 1987]).

Заключение

Результаты моделирования послеледниковой трансгрессии в районе Приморья показали, что при определенных условиях ход послеледниковой трансгрессии приближается к зафиксированным по полевым наблюдениям отметкам уровня Японского моря в районе побережья Приморья.

Отставание хода послеледниковой трансгрессии от эвстатической в этом районе в полной мере возможно объяснить только наличием прерывистых во времени сейсмотектонических погружений шельфа в первой половине голоцена.

Обоснованно выглядят более высокие значения вязкости мантийных слоев в рай-

оне Приморья сравнительно с вязкостными характеристиками мантийных слоев района Японских островов. Если Японские острова расположены непосредственно над зоной современной субдукции и находятся под влиянием этого процесса, то на район Приморья взаимодействие плит влияет уже в меньшей степени.

Превышения современного уровня моря в атлантический оптимум голоцена – около 5–6 тыс. л.н., зафиксированные на приморских побережьях, могут быть объяснены реакцией на гидроизостатическое погружение береговой линии вследствие относительно быстрого приращения водной нагрузки, под воздействием которой на шельфе усилился общий тренд нисходящих движений, а по окончании поступления талой ледниковой воды, за счет упруго-вязких свойств мантии, нисходящий тренд прервался и шельф вернулся на свой сбалансированный уровень.

В осцилляции колебаний уровня моря после достижения среднеголоценового максимума – регрессии в суббореале около 4 тыс. л.н. и начале субатлантика 2–2,5 тыс. л.н. – могли внести значительный вклад тектонические факторы, с усилением тенденции нисходящих движений. Это ставит вопрос о специальных исследованиях доли вклада колебаний климата в осцилляции уровня моря после голоценового климатического оптимума, если принять во внимание окончание деградации ледникового покрова Антарктиды 4–6 тыс. л.н.

Список литературы

1. Антипов М.П. **1987**. *Тектоника неоген-четвертичного осадочного чехла дна Японского моря*. М.: Наука, 86 с. (Труды ГИН; вып. 412).

2. Булгаков Р.Ф., Сеначин В.Н., Сеначин М.В. **2020**. Плотностные и реологические неоднородности мантии активных океанических окраин западного сектора Тихого океана и зоны Курильского глубоководного желоба. *Геосистемы переходных зон*, 4(1): 116–130. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.116-130

3. Игнатов Е.И. 2004. Береговые морфосистемы. Москва; Смоленск: Маджента, 352 с.

4. Каплин П.А. **1978**. Развитие шельфовой зоны в плейстоцене. В кн.: *Геоморфология и палеогео-графия шельфа*. М.: Наука, 157–164.

5. Короткий А.М., Караулова Л.П., Троицкая Т.С. **1980**. *Четвертичные отложения Приморья*. *Стратиграфия и палеогеография*. Новосибирск: Наука, 232 с.

6. Кузьмина Н.Н., Полякова Е.И., Шумова Г.М. **1982**. К истории голоценовой трансгрессии Японского моря. В кн.: *Геология морей и океанов: Тез. докл. V Всесоюз. школы морской геологии*. М.: Ин-т океанологии им П.П. Ширшова АН СССР, 1: 50–52.

7. Кузьмина Н.Н., Шумова Г.М., Полякова Е.И. и др. **1987**. Палеогеографические реконструкции голоцена северо-западного побережья и шельфа Японского моря. Изв. *АН СССР, Серия географическая*, 4: 78–89.

8. Кулаков А.П. 1973. Четвертичные береговые линии Охотского и Японского морей. Новосибирск: Наука, 187 с.

9. Плетнев С.П. **2012**. *Палеогеография осадочных бассейнов западной части Тихого океана (позд-ний мел – кайнозой)*: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Владивосток.

10. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пийп В.Б., Рашидов В.А., Сергеева Н.А., Филатова Н.И. **2005**. Геотраверс региона Охотского моря. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 5: 45–58.

11. Селиванов А.О., Степанов В.П. **1982**. Опыт геоархеологических исследований на морском побережье (на примере советского Приморья). В кн.: Изменения уровня моря. М.: Изд-во МГУ, с. 115–133.

12. Evelpidou N., Kawasaki S., Kararkani A., Saitis G., Spada G., Economou G. **2019**. Evolution of relative sea level in Okinawa (Japan) during Holocene. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 42: 3–16.

13. Farrel W.E., Clark J.A. **1976.** On postglacial sea level. *Geophysical J. International*, 46: 647–667. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1976.tb01252.x

14. Lambeck K., Rouby H., Purcell A., Sun Y., Sambridge M. **2014**. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(43): 15296–15303. https://doi.org/10.1073/pnas.1411762111

15. Nakada M., Yonekura N., Lambeck K. **1991**. Late Pleistocene and Holocene sea-level changes in Japan: implications for tectonic histories and mantle rheology. *Palaegeography, Palaeclimatology, Palaecology*, 85(1–2): 107–122. https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90028-p

16. Park S.-C., Yoo D.-G., Lee E.-I. **2000**. Last glacial sea-level changes and paleogeography of the Korea (Tsushima) Strait. *Geo-Marine Letters*, 20(2): 64–71. https://doi.org/10.1007/s003670000039

17. Peltier W.R. **2004**. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 20(32): 111–149. doi:10.1146/annurev.earth.32.082503.144359

18. Peltier W.R., Fairbanks R.G. **2006**. Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from as extended Barbados sea level record. *Quaternary Science Reviews*, 25: 3322–3337.

19. Peltier W.R., Argus D.F., Drummond R. **2015**. Space geodesy constrains ice-age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 120: 450–487.

https://doi.org/10.1002/2014jb011176

20. Pirazzoli P.A. **2005**. A review of possible eustatic, isostatic and tectonic contributions eight late-Holocene relative sea-level histories from the Mediterranean area. *Quaternary Science Reviews*, 24: 1989–2001. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.06.026

21. Spada G., Melini D. **2019**. SELEN 4 (SELEN version 4.0): a Fortran program for solving the gravitationally and topographically self-consistent sea level equation in Glacial Isostatic Adjustment modeling. *Geoscientific Model Development*, 12: 5055–5075. https://doi.org/10.5194/gmd-12-5055-2019

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

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

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

25. Tanabe S., Nakanishi T., Yasui S. **2010**. Relative sea-level change in and around the Younger Dryas inferred from late Quaternary incised-valley fills along the Japan Sea. *Quaternary Science Reviews*, 29: 3956–3971. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.09.018

26. Tushingham A.M., Peltier W.R. **1991**. ICE-3G – A new global model of late Pleistocene deglaciation based upon geophysical predictions of Post-Glacial relative sea level change. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 96: 4497–4523. https://doi.org/10.1029/90jb01583

27. Wu P., Peltier W.R. **1983**. Glacial isostatic adjustment and the free air gravity anomaly as a constraint on deep mantle viscosity. *Geophysical J. International*, 74: 377–449.

Об авторах

БУЛГАКОВ Рустям Фаридович (ORCID 0000-0001-9095-3785), кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, r.bulgakov@imgg.ru, АФАНАСЬЕВ Виктор Викторович (ORCID 0000-0002-2344-1269), кандидат географических наук, заведующий лабораторией береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, vvasand@mail.ru, ИГНАТОВ Евгений Иванович (ResearcherID 587057; Scopus ID 7801398734), доктор географических наук, профессор кафедры геоморфологии и палеогеографии, географический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва UDK 551.248.2,551.89

TRANSLATION https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.210-219.220-229

Effect of hydroisostasy on postglacial transgression on the shelf and coast of Primorye as revealed by computer modelling

© 2020 Rustam F. Bulgakov^{*1}, Victor V. Afanas'ev¹, Evgeniy I. Ignatov²

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia ²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia *E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

Abstract. Factors affecting the process of postglacial transgression on the shelf and coast of the Primorye (the territory of modern Primorsky Kray) in the Russian Far East are considered. The main regional feature consists in a significant lag of the sea level rise at the beginning of the Holocene following the completion of the Younger Dryas cold stadial. While some researchers explain this phenomenon in terms of descending tectonic movements that predominated in this region over the course of the Cenozoic era, traces of the Holocene climatic optimum sea level highstands along the coastline contradict the conclusion that tectonic submergence was uniform. In order to explain this contradiction, the hypothesis of hydroisostatic load compensation due to the viscoelastic properties of the mantle layers following the end of the last period of glaciation and involving the influx of huge volumes of water to the basin of the Sea of Japan is proposed. Dominating tectonic submergences of the western rim of the Sea of Japan and the Primorye coast were interrupted by hydroisostatic emergence during the Atlantic period between 5–6 ka BP. The use of a computer simulation of postglacial transgression in the SELEN 2.9 and SELEN 4.0 software environments demonstrates a transgression lag under hydroisostatic influence along with the increasing viscosity of mantle layers. The viscosity of mantle layers in the Primorye region is shown to be lower than for the Japanese Archipelago, which is located closer to the recent subduction zone.

Keywords: postglacial transgression, mantle viscosity, hydroisostasy, vertical movements, Primorye, Russian Far East.

For citation: 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. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 2, pp.220–229. (In Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.210-219.220-229

Introduction

In the Primorye region of the Russian Far East, where traces of Holocene coastlines raised above the contemporary sea level can be observed along the entire coast, significant postglacial transgression lag can be explained in terms of the eustatic factor. According to the data of [Park et al., 2000; Pletnev, 2012], there was no interruption in water mass influx to affect a lag in the course of transgression since the Sea of Japan never became isolated from the World Ocean even during the last glaciation maximum. In order to reveal the factors affecting the course of marine transgression, a computer simulation of sea level changes as a result of glaciers melting in dependence on rheological parameters of the mantle layers was carried out. Performed using the SELEN 2.9 and SELEN 4.0 software suites, developed by a collective of authors under the guidance of G. Spada [Spada, Stocchi, 2006; Spada, Stocchi, 2007; Spada et al., 2012; Spada, Melini, 2019], the simulation set out to examine the influence of hydroisostasy on the course of marine coastline transgression.

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Булгаков Р.Ф., Афанасьев В.В., Игнатов Е.И. Гидроизостазия как фактор, повлиявший на ход послеледниковой трансгрессии на шельфе и побережье Приморья, по результатам численного моделирования. *Translation by G.S. Kachesova*.

When analysing the literature data on sea level changes carried out by the methods of micropaleontological analysis and confirmed by means of absolute age determinations in the course of field researches, we took the altitude and age reconstructions of the traces of ancient coastlines into account. The quality of the data is sufficient to permit their use as reference marks for simulation of the curve of postglacial marine transgression and assessments of the relative contributions of eustatic transgression and tectonic movements.

Sea level change in the Primorye according to the results of field research

Korotkiy and co-authors [Korotkiy et al., 1980] note that achieving accurate determination of the Pleistocene stages of the shore development is extremely challenging due to the Cenozoic submergence of the Primorye coast and destruction of ancient coastlines. Although several abrasion terraces have been revealed on the Primorye shelf at depths of 20, 30–40, 100–120 m, their age is unknown. On the one hand, they may be tentatively dated to the Early, Middle or Late Pleistocene, but on the other, it is possible that they mark stages of postglacial transgression.

In any case, it should not be doubted that shelf transgression and regression regimes on the Primorye coastline changed more than once during the Pleistocene epoch. Although transgression and regression are apparently synchronous with planet-wide glacioeustatic oscillations of the World Ocean level, an accurate record of these sea level changes has yet to be practically revealed. On the shelf they have probably been eroded, since, when boring under coastalmarine layers of the Holocene and Upper Pleistocene sediments, it is typically sediments from the Neogene and later periods that are uncovered.

No traces of interglacial transgressions have been discovered apart from marine sediments revealed in several bays at levels close to the contemporary coastline. These traces are presented by littoral and lagoonal deposits having complexes of sublittoral and lagoonal diatoms along with the pollen of thermophilic plants. The authors [Korotkiy et al., 1980] do not even tentatively specify the age of these sediments.

At the beginning of the Holocene, the behaviour of the sea level curve is characterised as follows: "During the Amur (Preboreal) phase, the coastline of the Sea of Japan is located at around the -50 to -70 m marks. Sediments corresponding to the penetration of sea water into the valleys of the Tumannaya, Razdolnaya and Kievka rivers have been uncovered at the depths of (-48.7) and (-43) m. The most reliable position of the sea level during the Preboreal is determined in the well 2 in the Amur Bay, where the facies contour, separating continental sediments from marine, passes at the (-42.9) mark" [Korotkiy et al., 1980, p. 183]. Thus, at the beginning of the Holocene, notable lags from the sea level transgression, typical for eustatic curve, were not yet noted.

However, following the completion of the Younger Dryas period, within the period of melt water flow pulse MWP-1B (melt water pulse 1-B) [Peltier, Fairbanks, 2006; Tanabe et al., 2010], which accelerated the process of postglacial transgression, the resultant lags in the course of transgression are already being marked on the Primorye shelf.

Thus, despite the rare occurrence of the Holocene and Upper Pleistocene sediments on the middle Primorye shelf, Kuz'mina et al. [1987] describe such a section revealed by drilling on the shelf in the Kievka bay at a sea depth of 16-35 m, proposing to adopt it as the Holocene stratotype of the Primorye marine sediments. Although the authors suppose the location of bore to be relatively tectonically stable, as described by Kulakov [1973], they show that this area corresponds to the Central Sikhote-Alin geosuture. Continuous sedimentation taking place since the Sartan glaciation is recorded in the section with a sediments time interval of 20-25 ka BP. The section is paleontologically characterised and dated by the radiocarbon method.

In the borehole no. 132, drilled on the coastal shelf at the depth of 20 m, coastal sediments dated to 9660 ± 160 (MGU-822) were obtained, which, according to Kuz'mina et al. [1987], were formed a little lower than 48–49 m from the contemporary sea level, with their facies composition comprising evidence of the sea level position at that time. According to the results of pollen analysis, the dated layer is characterised by abrupt climatic warming, providing evidence of a melt water influx pulse MWP-1B – the event following the Younger Dryas, as it has been shown on the Island of Barbados [Peltier, Fairbanks, 2006; Tanabe et al., 2010]. The layer was being formed under conditions of an oxidising and active hydrodynamic regime [Kuz'mina et al., 1987].

Analysing the results of works of the laboratory of recent sediments and Pleistocene paleogeography of MSU in the Sea of Japan and generalising existing literature data, P.A. Kaplin [Kaplin, 1978] concludes that three complexes of the ancient coastlines traces are revealed on the Primorye shelf. Two of these are represented with cumulative forms at depths of 45–50 and 35–40 m respectively, having an age more than 40 ka BP, while the third occurs at a depth of 20–25 m and is dated to 7–8 ka BP.

Ancient coastline traces dated to 7–8 ka BP also occur at depths of 20–25 m, while on other coasts, including Okinawa Island, coastline traces from this age are identified at depths of 10–15 m [Evelpidou et al., 2019]. This also confirms a lag in the postglacial transgression occurring on the Primorye shelf.

Another feature of postglacial transgression on the Primorye coast can be seen in the change of the contemporary sea level relative to the Holocene optimum. Accumulative landforms of the Holocene age, located higher than the contemporary sea level, often consist of several generations of the beach ridges.

For example, in the Rudnaya Bay three such generations are distinguished extending into the land and having a height above the coast of 2, 3–4 and 5–6 m respectively. These are separated from swamped depressions comprising former lagoons. Accumulative forms consist of a series of sand and gravel deposits, which include sand-silt lenses. A large number of radiocarbon dates were obtained from the deposits of accumulative formswithin the interval from 5.5 to 1 ka BP [Ignatov, 2004].

Kuz'mina et al. [1982] identify a raised sea level of 2–3 m during the Atlantic period as compared to the contemporary sea level. They observe the apparent appearance of a (2.5-3)-metre marine terrace during this time to form the base of a 3.5-metre lagoonal coastal terrace. Later, at the beginning of the Subboreal period, a slight regression of the sea occurred, confirmed in the finds of archaeological sites: the sites are revealed on abrasion surface at a height of 4.5 m above its outcrop from the surf zone.

For the Middle Holocene period (Atlantic), Korotkiy et al. [1980] identify a raised Holocene terrace covering practically the entire coast of the Sea of Japan. At the southwestern Primorye it is represented with an extensive low-lying plain of the Khasan seaside, that is observed onwards towards the north-east in the rivers' mouths and bays heads. Its height ranges within 4-8 m. There is an alluvial-lagoonal terrace with a height of 3-4 m behind a zone of ancient storm walls. The amplitude of relative raises of a coastal land is ambiguously estimated: 2-3, 5-8 and 11-13 m. Therefore Korotkiy et al. [1980] propose to use height marks of the lagoonal layers roof in a section of 3–4-metre terrace as a benchmark against which to calibrate the extreme sea level oscillations of the Sea of Japan during the Middle Holocene.

The age of the lagoonal deposition in a section of 3–4-metre terrace ranges from 736 ± 160 years (MGU-IOAN-229) in the mouth of Barabashevka river and to 4500–5000 years in the mouth of Chernaya river. These lagoonal sediments correlate well with accumulations of beach sediments in a section of 5-metre marine terrace with the following radiocarbon datings: 5530 ± 110 years (GIN-738), 5630 ± 110 years (GIN-739a), 6000 ± 130 years (GIN-739b) [Korotkiy et al., 1980].

Further, within the Ambin (Subboreal) phase, a depression is observed relative to the maximum of the Atlantic for 2.5–3.0 m [Korot-kiy et al., 1980].

During the second half of the Subboreal, at a period of climatic warming, an observed increase in the sea level was confirmed with the settlements of ancient people at the structuraldenudation surfaces at a height of 20–40 m [Selivanov, Stepanov, 1982]. During the present Subatlantic age, a regression in the sea level has place too. Evidence of ancient human settlements (Yankovskaya culture 2500–2000 years ago) appears not only at the height of 4–5 m, but also at the contemporary sea level. In the Subatlantic-2 (SAT2) on the 2.5-metre marine accumulative terrace, molluscs 1420 ± 18 years (MGU-758) and 1400 ± 200 years (MGU-810) have been dated to demonstrate a transgression of the Sea of Japan. Archaeological data comprises evidence of the burial of the Yankovskaya culture artefacts within beach sand and pebble of coastal walls at a height of 4.2 m [Selivanov, Stepanov, 1982].

Thus, a common feature of the postglacial transgression course in the Primorye at the Holocene beginning, following the Younger Dryas cold stadial consists of a lag behind the eustatic transgression [Kaplin, 1978; Korotkiy et al., 1980; Kuz'mina et al., 1987]. Here, a lag of the sea level rise was continuing even following an increase in the rate of melt water influx.

The other characteristic feature of postglacial transgression in the Primorye is an increased sea level at the Atlantic period, followed by a smooth decline, accompanied with oscillations of regressions and transgressions with an amplitude of a few metres.

The character of the transgression/ingression course of the Sea of Japan on river valleys and rias typical of the Prymorye coast confirm the dominance of negative tectonic vertical movements in this region. Conversely, the general spreading of the raised coastlines of the Atlantic period comprises evidence of alternation of descending tectonic movements with rises.

The conclusion concerning abrupt, pulsed tectonic movements typical for the region as a whole, does not contradict the results of seismic sections analysis [Antipov, 1987], which shows that the deep-water basin of the Sea of Japan has been formed by two pulses of differentiated short-term descents: the Pre-middle Miocene and Late Quaternary. For the rims of the Sea of Japan, "flexural-fault" zones [Antipov, 1987], with which tectonic movements are associated, are typical.

Simulation of the postglacial curve of the sea level change for the Primorye

Using the SELEN 2.9 open code software, computations have been carried out in the work with the aim of obtaining the curves of postglacial change of the sea level for the area of the Primorye coast.

The SELEN 2.9 software suite is intended for so-called sea level equation (SLE) solving [Spada, Stocchi, 2006]. The solution of the "sea level equation" lies in the range of values of spatiotemporal variability of the World Ocean's floor structure by keeping gravity potential of the sea surface, constant for a specific melting scenario of the Ice Age sheet glaciers and viscoelastic model of the Earth [Wu, Peltier, 1983]. The software suite realises the fundamental principles proposed by Farrel and Clark [1976] to calculate the sea level changes following the redistribution of meltwater over the surface of a viscoelastic model of the Earth.

The computations were made for different rheological characteristics of the Earth mantle layers and under different glacial melting scenarios. In addition, within the test mode, we have conducted a simulation with help of the latest version of the SELEN 4.0 software [Spada, Meline, 2019]. New software version differs from the previous SELEN 2.9 with such updates as consideration of the Earth rotation, changes of the land and ocean configuration as the World Ocean level increases because of the Late Pleistocene glaciers melting, pole shift as glaciers degradation. The updated version of the ICE6gC model of the Late Pleistocene glaciation with the VM5a rheological model of a mantle [Peltier et al., 2015] is used to simulate glaciers melting in the SELEN 4.0. Only one computation is given here due to the failure to obtain stable results in the SELEN 4.0 software.

The values of viscosity of the mantle layers, used by Nakada et al. [1991] for estimation of mantle rheology of the Japan Archipelago and taken by us for computations, are given in the table below. He proposes three types of the viscous characteristic of the Earth mantle layers: A, B and C. We have added the fourth type D with viscosity values, ultimate for the

Lavan	Model							
Layer	ICE3gD	ICE3gB	ICE5gA	ICE5gB	ICE5gC	ICE5gD	SELEN 4	
Lithosphere, viscosity and thickness, km	∞, 55	∞, 30	∞, 50	∞, 30	∞, 30	∞, 55	∞, 90	
Upper mantle layer 1	1022				2·10 ¹⁹	1022	5·10 ²⁰	
layer 2	1022	2·10 ²⁰	2·10 ²⁰	2·10 ²⁰	$2 \cdot 10^{20}$	1022	5·10 ²⁰	
Transition layer, 400–670 km	1022				$2 \cdot 10^{20}$	1022	5·10 ²⁰	
Lower mantle layer 1	1023	10 ²²	1022	1022	1022	1023	1.5.1021	
layer 2	1023				1022	1023	3.2.1021	
layer 3	1023				1022	1023	3.2.1021	
layer 4	1023				1022	1023	3.2.1021	
layer 5							3.2.1021	
layer 6							3.2.1021	
Core	8	∞	8	8	∞	∞	∞	

Table. Viscous characteristics of the mantle layers, Pa·s

Note. The explanation of models' designation is given in the text.

mantle layers, as "the most viscous" [Bulgakov et al., 2020]. Models names in the table consist of a designation of a model of the postglaciation melting scenario – ICE3g [Tushingham, Peltier, 1991] and ICE5g [Peltier, 2004] with the addition of a symbol that represents the type of viscous characteristic of the Earth mantle layers.

Thus, for example, the ICE5gA designation stands for the computation of the ICE5g glaciers melting model on [Peltier, 2004] with a viscous model of A type on [Nakada et al., 1991].

As a result of computations, the curves of the sea level change in the postglacial period have been obtained for all the listed viscous characteristics and models of scenarios of melting of the glaciers of last glaciation. The obtained curves for the location point of Nahodka city are presented in Fig. 1. The curves designations match the models' names in the table.

Similar computation results of the course of postglacial transgression of the Primorye were obtained [Evelpidou et al., 2019] in the SELEN software for the ICE6g and VM5a models for the Okinawa Island of the Ryukyu Archipelago located comparatively nearby to the Primorye region. The computations results used when clarifying of the field data show the excess of the sea level at the Holocene optimum in the area of Ryukyu Archipelago.

Discussion

In comparing the results of numerical simulation of the Holocene transgression carried out by different authors for several models of the course of glaciers melting with data of the field observations in the Mediterranean Sea, P. Pirazzoli [2005] concluded that in some cases the computations results exceed and forestall the estimations obtained by the field observations at the coasts, while in the other cases they lag them. The analysis made by Pirazzoli [2005] shows that the numerical methods cannot precisely reconstruct the course of transgression in the all areas of the World Ocean.

It is necessary to point out that this situation continues despite the significant enhancement of both the computation methods and glacial melt models. In the present work, the computations are applied primarily in order to estimate the tendencies rather than to compute accurate height values for the marine paleolevels.

From the results of the field works presented above, the estimation of the level of the Sea of Japan seems the most reliable. This has been determined from the borehole no. 132 with an age of 9.6 ka BP at the depths about -48... -49 m [Kuz'mina et al., 1987], providing evidence of the extremely low sea level at this pe-





Figure 1. Postglacial transgression curves in the vicinity of Nakhodka.

riod. The assessment for chronologically subsequent position of the Sea of Japan level at depths of 20–25 m within the time interval of 7–8 ka BP [Kaplin, 1978] confirms the conclusion about the slowdown of transgression and expands the time interval in which this slowdown is marked.

A comparison of the value of the sea level of 9.6 ka BP (Fig. 1) with the sea level obtained by the results of no.132 borehole observation shows that the ICE3gD curve (the orange line), for which the sea level is about -37 m, is closest to these results. The same tendency – the closest proximity to the observed values – is clear for the time interval of 7–8 ka BP, when, according to observations, the sea level has been located at the 20–25 m depth, while on the ICE3gD curve, the depth is 10–19 m.

For the ICE3gD model, as shown in its designation, the ICE3g model of postglacial melting was used when perform computations. The equivalent curve of the sea level changes for this model is shown in Fig. 2. According to this curve, the total volume of the water that flowed into the ocean for 22 ka BP is equivalent to a sea level rise of 113.49 m, which

is lower than the value of 127.11 m calculated for the same period for the corrected ICE5g model. The difference between these two models' curves is especially important for the time period from 6 to 22 ka BP. Rather than try to explain why this occurred, we will simply note that the transgression rate within the time period from 6 to 22 ka BP on the curve of ICE3g model is lower than on the successive ICE5g version.

Although, on the one hand, the transgression rate has decreased due to water influx in the Primorye area, on many coasts at this time a pulse of accelerated water influx from the glacial melting has been observed – MWP-1B [Lambeck et al., 2014]. Here it is necessary to consider that, since the Sea of Japan was not isolated from the World Ocean, no interruptions were observed in water mass flow into the Sea of Japan; therefore, these could not have affected the transgression course by the data of [Park et al., 2000; Pletnev, 2012].

On the other hand, the D type of viscous characteristic of the mantle layers has the highest viscosity values (see table), at which obtained calculated curves of the sea level change demonstrates the greatest transgression lag.



Figure 2. Equivalent sea level (ESL) curves for ICE3g (a) and for ICE5g (b).

When analysing the curves by the other computation models, a general trend can be distinguished: the higher the "viscosity" of the mantle layers of model, the slower the transgression and the lower the even-aged sea levels. This is typical for both glacial melting models.

On the models with low viscosity values, such as ICE5gC, the transgression rate is the highest and the Middle Holocene excesses are the most significant. We note that the greatest excesses in the middle of the Holocene were obtained on the SELEN 4 curve, which was carried out by the advanced IVE6g scenario of the glaciers melting and the mantle model with low viscosity values.

Concerning the Middle Holocene transgression, which coincides with the climatic optimum and is noted on many coasts of the World Ocean, it is necessary to pay attention to the fact that the climatic oscillations, which are registered everywhere both by biostratigraphic methods and by the change of oxygen isotopes ratio, are not considered in models of glacial melting (Fig. 2 a, b) [Kaplin, 1978]. That is, an additional volume of melting water from the glaciers is not necessary to explain the observed traces of excesses of the contemporary sea level during the Atlantic climatic optimum of the Holocene, since the lithospheric and mantle relaxation following hydroisostatic load is sufficient for this purpose [Lambeck et al., 2014].

If this mechanism explains the Middle Holocene excess of the contemporary level, then it will also be reasonable not to exclude such a contribution made by hydroisostatic relaxation in respect of additional oscillations of the sea level observed on the Primorye coasts, including the regression in the Subboreal (4 ka BP), the small-scale transgression in the Subatlantic (2-2.5 ka BP) and the transgression in the Subatlantic-2 (1–4 ka BP).

On Honshu Island, the even-aged level of the Middle Holocene excess of the sea level in the various points of the island changes from total absence to several metres higher than the contemporary sea level [Nakada et al., 1991], which could not be explained in terms of oscillating melt water. These results may be given in support of the idea about the leading role of vertical movements of the Earth's crust in the result of hydroisostatic relaxation in the oscillations of the sea level following glacial melting.

We leave the question of whether the hydroisostatic load of the Sea of Japan basin with melt water from the glaciers of last sheet glaciation acted as an amplifier and accelerator of descending tectonic movements typical for the Primorye throughout the Cenozoic as a topic for a separate study, since it is beyond the scope of the present article.

Among viscosity models of A, B, C types borrowed from those applied for the Japanese Archipelago [Nakada et al., 1991], the highest Middle Holocene sea level excess was obtained when calculating for the models of C type with reduced viscosity, in which the contemporary level has been reached about 8 ka BP. Conversely, the models of D type with the highest viscosity values do not show the Middle Holocene sea level excess.

The most likely rheological characteristics of the mantle layers in the Primorye area are closer to the models of the A and B types. Here, although the transgression rate on the model of B type is not as high as that seen in C-type model, some increase relative to the contemporary level during the middle of Holocene is nevertheless noted. The curve obtained on the model of the A type is very similar to the curve of the B type; nevertheless, the lithosphere thickness of 50 km is closer to the data received using geophysical methods [Rodnikov et al., 2005]. The incomplete correspondence to the field observations is explained with an imperfection of the models of the course of glacial melting.

The peculiarities of sea level behaviour during the postglacial transgression obtained from the curves imply that the mantle layers in the Primorye area are more "viscous" in comparison with the area of Japanese Archipelago.

On the Echigo plain of Honshu Island at the eastern rim of the Sea of Japan, it was determined from core samples that the transgression accelerated within a time interval of 9.9-9.7 ka BP [Tanabe et al., 2010]. This is described as unique phenomena inherent only to this part of the coast of the Sea of Japan and did not occur in the other regions of the World Ocean. This acceleration is associated with coseismic tectonic submergences along the active fault, bounding the Echigo plain from the west. Here, the sea level after taking into account the contribution of seismotectonics is estimated at the level of -33.5 m for the age of 9.6 ka BP [Tanabe et al., 2010] (by comparison, in the Primorye it is just higher at between -48 and -49 m).

Taking into consideration that the simulation results approximate to the marks obtained by field observations for the Primorye region, but nevertheless are not identical with them, we may suppose, that coseismic tectonic submergences of the coast and shelf of the Primorye have contributed by analogy with Honshu Island. Although no active Holocene faults were revealed, the seismotectonic subsidences of the coast and shelf of the Primorye coast could occur along the "flexural-fault" zones [Antipov, 1987].

Conclusion

The results of the postglacial simulations in the Primorye area show that, under certain conditions, the course of postglacial transgression approximates to the marks of the Sea of Japan level registered by the field observations in the area of the Primorye coast.

The lag of postglacial transgression from eustasis in this area may be fully explained only by the presence of intermittent seismotectonic submergences of the shelf at the first half of the Holocene.

In comparison with viscous characteristics of the mantle layers of the Japanese Archipelago area, the effect of higher viscosity values of the mantle layers in the Primorye area seem to be more justified. The Japanese Archipelago is located directly above the contemporary subduction zone and is influenced with this process, while the interaction of plates affects the Primorye area to a significantly lesser extent.

Excesses of the contemporary sea level at the Atlantic optimum of the Holocene (about 5–6 ka BP) noted on the Primorye coasts may be explained by the reaction to hydroisostatic submergence of the coastline owing to a relatively rapid increase of the water load under which effect the common trend of descending movements has intensified on the shelf. Following the completion of glacial melt water influx, the descending trend has been interrupted and the shelf has returned to its balanced level due to viscoelastic properties of the mantle layers.

Coupled with an increase of the tendency of descending movements, the tectonic factors might make a significant contribution in the sea level oscillations following the attainment of the Middle Holocene maximum, i.e. the regression at the Subboreal about 4 ka BP and at the beginning of Subatlantic 2–2.5 ka BP. This raises the question about a special study on the contribution of climate fluctuations in the sea level oscillations following the Holocene climatic optimum, taking the completion of the Antarctica ice cap degradation at 4–6 ka BP into account.

References

1. Antipov M.P. **1987.** *Tektonika neogen-chetvertichnogo osadochnogo chekhla dna Iaponskogo moria* [*Tectonics of the Neogene-Quaternary sedimentary cover of the Sea of Japan floor*]. M.: Nauka, 86 p. (Trudy GIN [Transactions]; 412).

2. Bulgakov R.F., Senachin V.N., Senachin M.V. **2020.** 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. *Geosistemy perekhodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 4(1): 116–130. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.116-130

3. Evelpidou N., Kawasaki S., Kararkani A., Saitis G., Spada G., Economou G. **2019.** Evolution of relative sea level in Okinawa (Japan) during Holocene. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 42: 3–16.

4. Farrel W.E., Clark J.A. **1976.** On postglacial sea level. *Geophysical J. International*, 46: 647–667. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1976.tb01252.x

5. Ignatov E.I. 2004. Beregovye morfosistemy [Coastal morphosystems]. Moscow; Smolensk: Madzhenta, 352 p.

6. Kaplin P.A. **1978.** [Shelf zone development in the Pleistocene]. In: *Geomorfologiia i paleogeografiia shel'fa* [*Geomorphology and paleogeography of shelf*]. Moscow: Nauka, 157–164.

7. Korotkiy A.M., Karaulova L.P., Troitskaya T.S. **1980.** [Quaternary sediments of the Primorye. Stratigraphy and paleogeography]. Novosibirsk: Nauka, 232 p.

8. Kulakov A.P. **1973.** *Chetvertichnye beregovye linii Okhotskogo i Iaponskogo morei [Quaternary coast-lines of the Okhotsk and Japan Seas]*. Novosibirsk: Nauka, 187 p.

9. Kuz'mina N.N., Poliakova E.I., Shumova G.M. **1982.** [On the Holocene transgression history of the Sea of Japan]. In.: *Geologiia morei i okeanov: Tez. dokl. V Vsesoiuz. shkoly morskoi geologii* [Geology of the seas and oceans: Reports theses of the V All-Union marine geology school]. Moscow: In-t okeanologii im P.P. Shirshova AN SSSR [P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the AS USSR], vol. 1: 50–52.

10. Kuz'mina N.N., Shumova G.M., Poliakova E.I. et al. **1987.** [Paleogeographic reconstructions of the Holocene of the northwestern coast and shelf of the Sea of Japan]. *Izv. AN SSSR, Seriia geograficheskaia = Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR: Geography series*, 4: 78–89.

11. Lambeck K., Rouby H., Purcell A., Sun Y., Sambridge M. **2014.** Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(43): 15296–15303. https://doi.org/10.1073/pnas.1411762111

12. Nakada M., Yonekura N., Lambeck K. **1991.** Late Pleistocene and Holocene sea-level changes in Japan: implications for tectonic histories and mantle rheology. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 85(1–2): 107–122. https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90028-p

13. Park S.-C., Yoo D.-G., Lee E.-I. **2000.** Last glacial sea-level changes and paleogeography of the Korea (Tsushima) Strait. *Geo-Marine Letters*, 20(2): 64–71. https://doi.org/10.1007/s003670000039

14. Peltier W.R. **2004.** Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 20(32): 111–149. doi:10.1146/annurev. earth.32.082503.144359

15. Peltier W.R., Fairbanks R.G. **2006.** Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from as extended Barbados sea level record. *Quaternary Science Reviews*, 25: 3322–3337.

16. Peltier W.R., Argus D.F., Drummond R. **2015.** Space geodesy constrains ice-age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 120: 450–487. https:// doi.org/10.1002/2014jb011176

17. Pirazzoli P.A. **2005.** A review of possible eustatic, isostatic and tectonic contributions eight late-Holocene relative sea-level histories from the Mediterranean area. *Quaternary Science Reviews*, 24: 1989–2001. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.06.026

18. Pletnev S.P. **2012.** Paleogeografiia osadochnykh basseinov zapadnoi chasti Tikhogo okeana (pozdnii mel – kainozoi) [Paleogeography of the sedimentary basins of the western Pacific Ocean (Late Cretaceous – Cenozoic]: [dissertation abstract for the Candidate of geographical sciences]. Vladivostok.

19. Rodnikov A.G., Zabarinskaia L.P., Piip V.B., Rashidov V.A., Sergeeva N.A., Filatova N.I. [Geotraverse of the Sea of Okhotsk region]. **2005.** *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences*, 5: 45–58.

20. Selivanov A.O., Stepanov V.P. **1982.** [Experience in geoarchaeological investigations on a marine coast (by the example of the Soviet Primorye)]. In.: *Izmeneniia urovnia moria* [*Sea-level changes*]. Moscow: Isd-vo MGU [MSU Press], 115–133.

21. Spada G., Melini D. **2019.** SELEN 4 (SELEN version 4.0): a Fortran program for solving the gravitationally and topographically self-consistent Sea Level Equation in Glacial Isostatic Adjustment modeling. *Geoscientific Model Development*, 12: 5055–5075. https://doi.org/10.5194/gmd-12-5055-2019

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

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

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

25. Tanabe S., Nakanishi T., Yasui S. **2010.** Relative sea-level change in and around the Younger Dryas inferred from late Quaternary incised-valley fills along the Japan Sea. *Quaternary Science Reviews*, 29: 3956–3971. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.09.018

26. Tushingham A.M., Peltier W.R. **1991.** ICE-3G – A new global model of late Pleistocene deglaciation based upon geophysical predictions of Post-Glacial relative sea level change. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 96: 4497–4523. https://doi.org/10.1029/90jb01583

27. Wu P., Peltier W.R. **1983.** Glacial isostatic adjustment and the free air gravity anomaly as a constraint on deep mantle viscosity. *Geophysical J. International*, 74: 377–449.

About the Authors

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

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

IGNATOV Evgenii Ivanovich (ResearcherID 587057; Scopus ID 7801398734), Dr Sci. (Geography), Professor of the Department of geomorphology and paleogeography, Geography Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow

УДК 551.89(571.63)

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.230-249

Палеоозеро острова Шкота: природный архив изменений климата и ландшафтов

© 2020 Н. Г. Разжигаева^{*1}, Л. А. Ганзей¹, Т. Р. Макарова¹, Т. В. Корнюшенко¹, Е. П. Кудрявцева¹, К. С. Ганзей¹, В. В. Судьин², А. А. Харламов³

¹Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия ²Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН, Москва, Россия ³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия *E-mail: nadyar@tigdvo.ru

Резюме. На о. Шкота (архипелаг Императрицы Евгении в зал. Петра Великого Японского моря) найдено палеоозеро, образованное при формировании томболо, в отложениях которого записаны изменения природной среды со второй половины среднего голоцена. Биостратиграфическое изучение включало диатомовый и спорово-пыльцевой анализы, определялись непыльцевые палиноморфы и фиксировались находки углей. Восстановлена эволюция водоема, прошедшего стадии распресненной лагуны, пресноводного озера, активное заболачивание которого началось около 1240 кал. л.н., а формирование торфяника шло последние 1000 кал. лет. В основании торфяника найден маркирующий вулканический пепел B-Tm кальдерообразующего извержения влк. Байтоушань. Большая часть зерен вулканического стекла имеет трахитовый состав. Заплеск морской воды в палеоозеро происходил в сильные шторма или цунами, определен возраст фаз, когда поступление морской воды происходило более интенсивно. Помимо морских сублиторальных диатомей в отложениях найдены неритические виды и силикофлагелляты. В озере была богатая водная растительность, включавшая редкие виды. В оптимум голоцена остров покрывали сомкнутые дубово-грабовые леса с большим участием широколиственных пород. Определена их деградация в ходе короткопериодных колебаний климата с трендом на похолодание, выделены фазы развития растительности. Хвойные породы появились на острове в более прохладных условиях позднего голоцена, кедр корейский был наиболее распространен в малый оптимум голоцена. Установлено, что древесная растительность становится более разреженной в малый ледниковый период. Выявлены признаки антропогенного влияния на палеоландшафты, связанные с заселением острова и деятельностью древнего человека. Выделены следы палеопожаров, определен их возраст и влияние на локальную растительность.

Ключевые слова: островные ландшафты, палеоозеро, изменения климата, средний-поздний голоцен, Южное Приморье.

Для цитирования: 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 ландшафтов. *Геосистемы переходных зон*, 2020, Т. 4, № 2, с. 230–249. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.230-249.

Paleolake of Shkot Island: natural archive of climatic and landscape changes

Nadezhda G. Razjigaeva^{*1}, Larisa A. Ganzey¹, Tatiana R. Makarova¹, Tatiana V. Kornyushenko¹, Ekaterina P. Kudryavtseva¹, Kirill S. Ganzei¹, Vladislav V. Sudin², Andrey A. Kharlamov³

¹Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

²A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science RAS, Moscow, Russia

³P.P. Shirshov Oceanological Institute RAS, Moscow, Russia *E-mail: nadyar@tigdvo.ru

Abstract. Results of a biostratigraphic study carried out on a paleolake discovered on Shkot Island in the Eugénie Archipelago within Peter the Great Gulf of the Sea of Japan are presented. The study, which included diatom and pollen analyses, identified the presence of non-pollen palynomorphs and microcharcoal deposited during the formation of the island's tombolo, providing a record of environment changes taking place during the second half of the Middle Holocene. A reconstruction carried out on the basis of this data shows an evolution through the stages of desalinated lagoon and freshwater lake, whose active swamping began around 1240 cal BP, with the formation of a peat bog taking place over the course of around 1000 years. At the base of the peat bog, B-Tm volcanic ash marking the caldera-forming eruption of the Baitoushan volcano was identified. Most of the volcanic glass grains have a trachyte composition. The approximate dates of invasions of sea water in the paleolake having occurred during strong storms or tsunamis were determined. In addition to marine sublittoral diatoms, neritic and silicoflagellate species were found in the sediments. It is shown that the lake was once rich in aquatic vegetation, including rare species. During the Holocene optimum, the island was covered by forests with a large participation of broadleaf tree species, including oak and hornbeam. The degradation of these forests during short-period climate fluctuations with an overall cooling trend was determined along with the main vegetation development phases. Conifers appeared on the island under the cooler conditions of the Late Holocene, with Korean pine being most common in the Medieval Warm Period. Forest vegetation became sparser during the Little Ice Age. The human impact on paleo landscapes, associated with the settlement of the island and the activity of ancient humans, was revealed. Traces of paleo fires were identified along with their age and influence on local vegetation patterns.

Keywords: island landscapes, paleolake, climatic changes, middle-late Holocene, South Primorye.

For citation: 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. *Geosistemy perekhodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 230–249. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.230-249

Благодарности и финансирование

Авторы выражают благодарность С.Д. Прокопцу (Институт истории, археологии и этнографии народов Дальнего Востока ДВО РАН) за консультации по археологическим стоянкам островов Русский и Шкота и фотографию о. Шкота и рецензентам за конструктивные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-77-00001).

Введение

Малые острова занимают особое место в островном ландшафтоведении. Специфика развития ландшафтов таких островов во многом определяется особенностями изменения биотических компонентов в условиях небольшой территории, особую роль здесь играет фактор изоляции. Даже на материковых островах, расположенных близко к континенту, изоляция которых насчитывает несколько тысяч лет, могут возникнуть специфические растительные ассоциации [Недолужко, Денисов, 2001; Крестов, Верхолат, 2003; Родникова и др., 2012], а ход их развития может существенно отличаться от большого массива островной суши или от ландшафтов близлежащего побережья материка [Лящевская, 2015]. Малейшее вмешательство человека в такого рода островную экосистему может привести к ее быстрой трансформации и развитию геокомплексов с гипертрофированным доминированием того или иного вида или растительных ассоциаций, не присущих островной флоре.

На небольших островах с низкогорным рельефом обычно трудно найти объекты для палеореконструкций. Перспективен поиск береговых палеоозер, в отложениях которых наиболее детально записывалась информация о палеоландшафтных сменах, позволяющая восстановить их с высоким разрешением.

Возможности использования таких палеозер в качестве природного архива изменений среды показаны в данной работе на примере о. Шкота, расположенного в зал. Петра Великого. Для острова впервые выполнены комплексные ландшафтные исследования, включающие как наземные, так и подводные ландшафты, находящиеся в тесной парагенетической связи [Ганзей К.С. и др., 2019 б, в]. Палеогеографические исследования, результаты которых представлены в этой статье, имели целью выявить реакцию островных ландшафтов на короткопериодные климатические изменения в среднем-позднем голоцене, определить время и причины ландшафтных смен и тенденции их развития, а также вклад антропогенного фактора в развитие растительности в палеоаспекте и в последние десятилетия.

Краткая характеристика района исследований

Остров Шкота расположен к югу от о. Русский и отделен от мыса Забытый проливом шириной до 780 м. Аккумулятивная форма (томболо), образованная в зоне волновой тени, и дамба соединяли о. Шкота с о. Русский. Раньше здесь была дорога [Стратиевский, 2012], в настоящее время дамба (на участке длиной 120 м) размыта и коса осушается только в сильный отлив. Площадь острова 2.46 км², рельеф низкогорный, максимальная высота 147 м. В ландшафтной структуре выделено 16 единиц в ранге урочищ [Ганзей К.С. и др., 2019б]. Господствующим типом растительности является лесной. Территория острова занята широколиственными лесами с преобладанием дуба монгольского с участием граба сердцелистного, липы амурской, ясеня носолистного, кленов мелколистного, ложно-Зибольдова и зеленокорого, ильма японского. Кустарниковый ярус включает калину Саржента, чубушник тонколистный, жимолости Рупрехта и золотистоцветковую, лещину маньчжурскую и др. Небольшие площади занимают гмелинополынники (Artemisia gmelinii) с участием леспедецы двуцветной и разнотравья и луговые сообщества. Аккумулятивную форму занимают кустарниково-разнотравные сообщества. Дифференциация ландшафтов во многом обусловлена экспозиционным эффектом: высокосомкнутые леса занимают склоны, максимально защищенные от влияния моря, разреженные низкорослые леса и кустарниковые заросли тяготеют к ветробойным южным и восточным участкам. Единично встречается сосна густоцветковая (Pinus densiflora) [Ганзей К.С. и др., 20196; Родникова и др., 2012]. Остров активно использовался в военных целях в XX в. Наиболее трансформированы ландшафты приводораздельной части и вдоль дорог, есть следы пожаров, распространению которых способствует активное рекреационное использование острова. На долю антропогенно измененных ландшафтов приходится 2.12 % площади острова [Ганзей К.С. и др., 20196]. С восточной стороны перешейка сохранились многочисленные бетонные чаны, использовавшиеся для засолки рыбы (Дальгосрыбпром) в 1930-е годы [Стратиевский, 2012].

Аккумулятивный перешеек формировался как двойное томболо за счет потоков наносов, поступавших с разных сторон острова. При замыкании кос во внутренней части осталось понижение, в котором образовалось береговое озеро (170 ×30 м), вытянутое вдоль подножья склона. На космоснимке хорошо выражена протока, соединявшая озеро с бухтой Новый Джигит. Такое развитие аккумулятивных процессов довольно типично для островов зал. Петра Великого. Примерами являются озера на островах Большой Пелис [Борзова и др., 1981] и Стенина [Лящевская и др., 2017а]. Аналогичным образом устроены аккумулятивные формы, соединившие палеоострова, ныне полуострова Песчаный и Ломоносова, с материком. В настоящее время озеро на о. Шкота полностью заросло, на его месте в понижении развито осоковотростниковое болото.

Материалы и методы

Разрез заложен в центральной части палеоозера (42°56′56.2′′ N, 131°49′47.8′′ E). Здесь было проведено ручное бурение и выкопан шурф (рис. 1). Мощность вскрытых отложений составила 1 м. Верхнюю часть разреза слагает торфяник (0–0.5 м) и торфянистый алеврит (0.50–0.55 м), ниже залегает серый алевритовый ил (0.55–1.00 м), с дресвой в основании. В инт. 0.15–0.20 м обнаружены гнезда суглинка, на глубине 0.20–0.25 м найден редкий гравий (до 4 мм). В основании торфяника (инт. 0.48–0.50 м) залегает вулканический пепел, представленный гнездами зеленовато-серого алеврита.

Биостратиграфическое изучение включало диатомовый и спорово-пыльцевой анализы, выполненные по стандартным методикам

[Диатомовые..., 1974; Покровская, 1966]. При определении эколого-географических характеристик видов диатомей использованы сведения из работ [Цой, Обрезкова, 2017; Krammer, Lange-Bertalot, 1986, 1988, 1991]. На диаграмму вынесены основные виды, отражающие смену экологических условий. Обработка проб на спорово-пыльцевой анализ сделана по методу В.П. Гричука [Гричук, 1940]. Подсчет процентного содержания таксонов проводился для пыльцы древесных, травянистых и кустарничков и спор. Диаграмма построена в программе Tilia v. 2-0-41 [Grimm, 2004]. Пыльца культурных злаков идентифицирована по критериям, предложенным Е.А. Сергушевой с соавторами [Сергушева и др., 2016]. При просмотре препаратов отмечалось присутствие углей и обугленных



Рис. 1. Схема района работ и положение изученного разреза на о. Шкота. (а) схема Япономорского региона; (b) о-ва Русский и Шкота и положение изученного разреза; (c) положение изученного разреза на о. Шкота; (d) фотография о. Шкота и пересыпи, соединяющей его с о. Русский, положение палеоозера.

Figure 1. Studied area and position of studied section on Shkot Island. (a) – The Sea of Japan Region; (b) – Russky and Shkot islands and location of studied section; (c) – Shkot Island and location of studied section; (d) – photo of Shkot Island and paleolake location.

Радиоуглеродное датирование (см. таблицу) выполнено в Институте наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета. Калибровка радиоуглеродных дат проведена в программе OxCal 4.3 с калибровочной кривой «IntCal 13» [Bronk Ramsey, 2017]. Идентификация источника тефры сделана на основании химического состава вулканического стекла. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ проводились в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова на приборе LEO SUPRA 50 VP (Carl Zeiss, Германия) с использованием

энергодисперсионного анализатора X-MAX 80 (Oxford Inst., UK) при ускоряющем напряжении 25 кВ и размере апертуры 60 мкм. Проанализировано 15 зерен, данные пересчитаны на безводный остаток.

Результаты и обсуждение

Геохронология, скорости накопления отложений. Определение возраста нижней части разреза, сложенной терригенными отложениями, выполнено на основании корреляции спорово-пыльцевых данных и установленных особенностей растительности времени их накопления с палинологическими записями и фитоценотическими реконструкциями, полученными по голоценовым разрезам ближайших районов. В основании толщи илов зафиксировано максимальное количество пыльцы широколиственных пород (до 89.5 %), в том числе и граба (Carpinus – до 24.6 %), что позволяет предположить, что лагуна на острове образовалась

Номер образца	Интервал, м	Материал	Радиоуглеродный возраст, лет	Калиброванный возраст, кал. лет	Лабораторный номер			
1/318	0.5–0.55	Торфянистый алеврит	1340 ± 120	1240 ± 130	ЛУ-9254			
2/318	0.2–0.25	Торф	90 ± 60	140 ± 80	ЛУ-9255			
3/318	0.3–0.35	Торф	730 ± 70	680 ± 60	ЛУ-9256			

Таблица. Результаты радиоуглеродного датирования отложений палеоозера на о. Шкота Table. Results of radiocarbon dating of the paleolake sediments of Shkot Island

в оптимум среднего голоцена. На севере о. Русский в разрезе «Подножье 1» палиноспектры с максимальным содержанием пыльцы широколиственных деревьев (79–92 %), в том числе граба (20–25 %), позволили установить, что около 6600–6400 кал. л.н. условия были намного теплее и влажнее современных и, возможно, достигали максимального уровня в голоцене [Микишин и др., 2019]. В разрезе «Поспелово» палиноспектры с содержанием пыльцы граба (17 %) отмечены для интервала около 5500–5460 кал. л.н. [Микишин, Гвоздева, 2014].

Широкое развитие аккумулятивных форм этого возраста характерно для побережья Приморья [Короткий и др., 1997]. Мы предполагаем, что примерно в это время образовалось озеро на о. Шкота. Скорости накопления отложений в водоеме были низкими – около 0.1 мм/год, основным источником терригенного материала был плоскостной смыв с абразионно-денудационного уступа, рядом с которым располагался водоем.

В результате интенсивного зарастания озера началось органогенное осадконакопление. Из перекрывающего илы торфянистого алеврита (0.50-0.55 м) получена ¹⁴С-дата 1340 ± 120 л.н., 1240 ± 130 кал. л.н., ЛУ–9254, а в основании торфа обнаружен прослой тефры, сопоставляемый с маркирующим вулканическим пеплом В-Тт кальдерообразующего извержения влк. Байтоушань 946/947 гг. [Сахно, 2007; Chen et el., 2016]. Впервые прослой вулканического пепла В-Тт в континентальных отложениях Приморья найден на побережье бухты Кит [Ганзей Л.А. и др., 2015] и в ряде других бухт. На о. Русский тефра (мощностью до 3 см) обнаружена в разрезах торфяников и почв в обрамлении береговых озер на побережье бухт Парис и Спокойная. В горных районах вулканический пепел

В-Тт найден на Шкотовском, Сергеевском, Шуфанском плато и верховьях р. Уссури [Разжигаева и др., 2019].

Как и в других точках, в составе тефры на о. Шкота преобладает бесцветное вулканическое стекло, представленное волокнисто-удлиненными и пузырчатыми разностями (большая часть зерен имеет размер 200-300 мкм) (рис. 2). Макроэлементный состав (в %) большей части зерен характеризуется небольшим разбросом значений: SiO, (65.92–68.82), Al₂O₂ (14.67–15.58), xapakтерно высокое содержание К₂О (5.34-5.92), Na₂O (4.59–6.13), K₂O+Na₂O (10.46–11.05), низкое ТіО, (0.40–0.68), СаО (1.03–1.43), MnO (<0.21), FeO (4.69-5.01). Близкий состав имеет и вулканическое стекло этого возраста из отложений Амурского залива [Акуличев и др., 2016]. По составу вулканическое стекло аналогично трахитовым разновидностям из проксимальной и дистальной зон [Chen et al., 2016; McLean et al., 2016]. Риолитовый состав, типичный для тефры начальной фазы извержения [Chen et al., 2016], имеет только одно зерно (в %): SiO₂ 70.80, Al₂O₃ 13.98, K₂O 5.29, Na₂O 6.50, K₂O+Na₂O 11.78, CaO 0.37, FeO 3.06, MgO, TiO₂, MnO – ниже предела чувствительности прибора.

Зарастание озера привело к увеличению скоростей осадконакопления от 0.26 мм/ год (накопление торфянистого алеврита) до 0.4 мм/год, когда образовался торфяник. В малый ледниковый период (¹⁴С-дата 730 ± 70 л.н., 680 ± 60 кал. л.н., ЛУ-9254) скорости увеличились до 0.5 мм/год. Дата ЛУ-9255 (см. таблицу) рассматривается как омоложенная.

Стадии развития палеоозера. В отложениях разреза обнаружено 82 вида и разновидности пресноводных и 9 видов солоноватоводных и морских диатомовых водорослей.



Рис. 2. Вулканическое стекло из отложений палеоозера о. Шкота: (а) морфология; (b) соотношение SiO₂ и K₂O в вулканическом стекле, найденном на о. Шкота (1) и разрезах голоценовых отложений из других районов Приморья (2).

Figure 2. Volcanic glass from paleolake sediments of Shkot Island: (a) morphology; (b) SiO_2 versus K_2O plot for volcanic glass found on Shkot Island (1) and Holocene deposits from other sites of the Primorye (2).

Наиболее разнообразны донные виды (43), меньше видов обрастания (28), слабо представлены планктонные диатомеи (11). Преобладают космополиты (56 видов), бореальных встречено 13 видов, арктобореальных - 4. По отношению к рН среды доминируют алкалифилы (36), циркумнейтральных видов - 24 и ацидофилов - 13 видов; по отношению к солености 38 видов – индифференты, 14 - галофобы и по 10 - галофилов и мезогалобов. Изменение содержания видов диатомей по разрезу позволило выделить 4 комплекса, отражающих эволюцию палеоозера (рис. 3). По мере изменения солености и трофности водоема менялся и состав водных растений (рис. 4).

На начальном этапе (около 6600 кал. л.н.) образовалась мелководная распресненная лагуна. В составе диатомей (комплекс 1) преобладают пресноводные виды-обрастатели (до 87.5 %). Доминантом является галофил Staurosira subsalina (до 51 %), предпочитающий слегка солоноватые воды, субдоминант – Pseudostaurosira elliptica (до 36 %). Оба вида характерны для мелководных озер со стоячей водой, заросших водной растительностью. Заметно участие планктонных Aulacoseira granulata и Cvclotella meneghiniana. По отношению к рН доминируют алкалифилы (до 64.3 %), по отношению к солености – галофилы (до 54.8 %). Почти полное исчезновение Epithemia adnata, широко распространенного пресноводного олиго-мезотрофного

вида, отражает увеличение трофности водоема около 3050 кал. л.н. Рост численности *Aulacoseira granulata* говорит об умеренно эвтрофных условиях.

Список морских и солоноватоводных диатомей включает 14 таксонов, их содержание составляет 8.8-20.6 %, что свидетельствует о довольно слабом водообмене лагуны с морем. Преобладают характерные для лагун солоноватоводные бентосные Navicula peregrina, Gyrosigma acuminatum, солоноватоводно-пресноводный планктонный Thalassiosira bramaputrae. Поступление морских видов происходило в сильные шторма или цунами. Наиболее интенсивное поступление морской воды в лагуну фиксируется в илах из подошвы разреза (6600-6400 кал. л.н.). Здесь отмечено максимальное количество морских и солоноватоводных диатомей (20.6 %), найдены виды, характерные для открытого побережья – бентосные Pinnunavis yarrensis (до 8.6 %), Cocconeis scutellum, а также бентосный Amphora mexicana var. major, характерный для теплых морей.

Пики содержания морских видов (11 – 18.9 %) свидетельствуют об усилении штормовой активности в интервале времени около 3050–1840 кал. л.н. В илах отмечена *Tabularia fasciculata* (до 1.1 %), колониальная прикрепленная микроводоросль, обычная для обрастания твердых поверхностей и макроводорослей, предпочитающая воду, обогащенную растворенным органическим веществом



Hq Соленость эиньтидоотээМ Thalassiosiva bramaputrae sisnerva varianta $\gamma arrenand$ subSələ sivpnuniG[ίματος ενος ναπλεμνελί] staurosira subsalina Staurosira elliptica novernesines dhow the standard siend standard standardвіичэдаія віроівдоля sipinin vinvluniaPinnularia subcapitata sintsəqur kirklunniqpinnimyaq pihəsztiV ขนาง8ององ ซากวางหญ $pviits \partial f pluoiv N$ p_1 p_1 p_2 p_1 p_2 p_3 p_4 p_1 p_2 p_3 p_4 p_4 рэільдпий ріогіптэл $s\Lambda xoiyduw viyosztuwH$ iivəsnəqz amgizovyð иппллюд втэполдтод Gomphonema angustatum var. lineare psopnpd pitonuA sinanlid aitonuA pinnha adnata G_{I} Aulacoseira granulata mumissitunim muibidtnondah



Геосистемы переходных зон Том 4 № 2 2020

[Бегун и др., 2011]. Во время штормов в водоем поступал тепловодный неритический Chaetoceros vanheurskii (до 4.7 %). Это довольно редкий для зал. Петра Великого вид. Оптимальные условия для его развития: соленость 30-35 ‰, температура 20-30 °C [Shevchenko et al., 2006]. Увеличение его содержания (до 4.7 %) в илах, накопление которых происходило около 2450-1840 кал. л.н., свидетельствует о хорошей прогреваемости морской воды. Признаками заплеска морских вод в сильные шторма или цунами являются и находки силикофлагеллят (4255-3652 и 2450-1843 кал. л.н.), обитающих только в морских водах. Оба интервала совпадают с малоамплитудными трансгрессиями [Короткий и др., 1997].

В лагунном озере была богатая водная растительность. Присутствие пыльцы ежеголовника (Sparganium), водяного ореха (Trapa), кувшинки (Nymphaeaceae), пузырчатки (Urticularia), рдеста (Potamogeton) свидетельствует о том, что в отдельные краткосрочные фазы водоем становился пресным. Эта тенденция стала особенно ясно просматриваться после снижения уровня моря в похолодание на границе среднего-позднего голоцена. Около 4860 кал. л.н. озеро начало активно зарастать рогозом. Появление водяного ореха приурочено к оптимуму суббореала (4255-3650 кал. л.н.). В наше время на о. Русский известен водяной орех ложнонадрезанный (Trapa pseudoincisa Nakai) в оз. Известковое на берегу бухты Парис [Недолужко, Денисов, 2001].

В изученном разрезе среди непыльцевых палиноморф встречена зеленая водоросль *Botrycocus*, способная обитать в солоноватоводных и пресноводных водоемах. Когда озеро стало более распресненным, получила распространение зеленая водоросль рода *Pediastrum*, образующая колонии на дне неглубоких чистых, в основном пресноводных водоемов. В состав планктона входили нитчатые сине-зеленые водоросли *Anabaena*, обитающие в пресных и слабосоленых водоемах и вызывающие цветение стоячей воды.

Соленость водоема снижается, и около 1240 кал. л.н. озеро становится практически пресным, начинается органогенное осадко-

накопление. В составе диатомей исчезают морские виды, сокращается содержание солоноватоводных диатомей (2.3-3.1 %). Появляются разнообразные виды из родов Eunotia, Pinnularia. Растет и разнообразие видов из рода Gomphonema, которые могли поступать со сточными водами, что косвенно говорит о формировании ложковой сети и развитии временных водотоков. Резко увеличилось (до 4.2 %) участие эпифита Lemnicola hungarica, обычно сосуществующего с разными видами ряски [Buczkó, 2007], растущей только в пресной стоячей воде. Здесь же найдена пыльца ряски (Lemna), что указывает на более теплые условия водоема. Вспышка Planothidium delicatulum (4.1 %), вида-эпипсамита, тяготеющего к вегетации на песчаном грунте [Балашова и др., 2016], в слое торфа с тефрой В-Тт, вероятно, связана с вулканическим пеплопадом.

В малый ледниковый период (14С-дата 730 ± 70 л.н., 680 ± 60 кал. л.н., ЛУ-9256) усилились процессы зарастания и заболачивания озера (комплекс 2). Возросло количество галофобов (до 17.1 %) и ацидофилов (до 23 %). В составе пресноводных диатомей сократилось количество створок видов-обрастателей (до 56.6 %) и увеличилась доля донных видов (до 50 %). Доминирует попрежнему Staurosira subsalina (до 30 %), увеличивается содержание характерно ных для болотных обстановок видов родов Eunotia (E. paludosa, E. glacialis, E. bilunaris, *E. exigua* и др.) и *Pinnularia* (*P. subcapitata*, P. viridis, P. rupestris). Возрастает содержание населяющего сильно кислые болота Navicula festiva. Среди донных стало много Navicula cincta, который мог обитать в слегка соленых условиях. В целом, участие солоноватоводных видов сильно сокращается, что говорит о дальнейшем уменьшении связи водоема с морем.

Среди водных растений появилась уруть, которая развивается при глубине не менее 0.5 м, было много рдеста.

Рост доли α-мезосапробионта Navicula cincta и β-мезосапробионтов Stauroneis phoenicenteron и Gomphonema parvulum может свидетельствовать о повышении трофности воды около 450 кал. л.н. Причем

обрастатель G. parvulum, как правило, предпочитает олиготрофно-мезотрофные воды. Увеличение количества бореальных видов свидетельствует о более холодных условиях. Присутствие прибрежно-морских диатомей связано со штормами и цунами. Солоноватоводно-морской Pinnunavis yarrensis (до 1.3 %) заносился в озеро в сильные шторма. Находка Cocconeis scutellum и присутствие в торфе гравия может быть свидетельством цунами (450-340 кал. л.н.). Заплеск был не менее 140 м; вероятно, затапливался весь перешеек. Возможно, здесь зафиксированы следы цунами XVII в., осадки которого найдены и на берегу бухты Спокойная, восточное побережье о. Русский [Ганзей Л.А. и др., 2016]. В Японском море было два сильных цунами: 26 ноября 1614 г. (префектура Ниигата) и в октябре 1644 г. (префектура Акита), высота волн на о. Хонсю достигала 6 м [Iida, 1984].

Выделяется кратковременный сухой период (~340-230 кал. л.н.), когда площадь озера сильно сокращалась. Диатомовая флора (комплекс 3) характеризуется увеличением количества донных видов (до 70.4 %), уменьшением видов-обрастателей (до 35.5 %) и исчезновением планктона. Доминируют донные Hantzschia amphioxys – вид, способный обитать на осушках и характерный для почв, Lemnicola hungarica, Navicula cincta, Gomphonema parvulum. Высокое содержание эпифита L. hungarica (до 18.6 %) говорит о том, что водоем был весь затянут ряской. Появляются арктобореальные виды: Pinnularia ignobilis (до 4.7%), Pinnularia divergentissima (до 2.5 %), что свидетельствует о более холодных условиях. Последний вид характерен для слабоминерализованных вод, может обитать в аэробных местах на мхах [Харитонов, 2010; Krammer, Lange-Bertalot, 1986]. Состав диатомей указывает на уменьшение водности водоема и обмеление. Отсутствие морских и солоноватоводных видов свидетельствует о полном прекращении связи водоема с морем. Сухие условия не исключают прохождение отдельных катастрофических ливней, связанных с сильными тайфунами. Вероятно, во время такого события за счет интенсивного плоскостного смыва образовались

гнезда суглинка. Состав диатомей в них близок к вмещающему торфу, несколько выше содержание почвенной *H. amphioxys*.

Последние 200–230 лет наблюдалось обводнение водоема за счет увеличения атмосферных осадков. Среди диатомей (комплекс 4) увеличивается количество видов-обрастателей, вновь появляются планктонные виды (до 1.6 %). Доминируют Staurosira subsalina (до 28 %), Gomphonema parvulum (до 27 %), заметно участие донных Hantzschia amphioxys, Navicula cincta, Pinnularia viridis. В кровле слоя увеличивается доля Pinnularia subcapitata, P. divergentissima, указывающих на развитие болотных процессов. Относительно высоким остается число арктобореальных и бореальных видов. Мезогалобы практически исчезают.

На заключительном этапе, пока существовало озерко, среди водных растений рос редкий вид – кальдезия почковидная *Caldesia reniformis* (D. Don) Makino, который сейчас встречается в бассейнах рек Раздольная, Уссури и оз. Ханка и находится на грани исчезновения [Красная книга..., 2008].

История растительности. Изменения состава спорово-пыльцевых спектров по разрезу позволило выделить 4 палинозоны (рис. 4), отражающие динамику растительности о. Шкота и в какой-то мере южного побережья о. Русский, откуда шел воздушный перенос пыльцы.

Палиноспектры с преобладанием пыльцы древесных растений (до 76 %) отражают развитие во второй половине среднего голоцена (6600-4554 кал. л.н.) сомкнутых дубово-грабовых лесов с участием ильма, ореха, липы, ясеня, кленов (палинозона 1). Участие широколиственных пород в лесной растительности было намного выше, чем в настоящее время. Отчасти этому способствовали и экспозиционные условия, поскольку северные и западные склоны, обращенные к озеру, являются наиболее термообеспеченными - они закрыты от ветров с моря и о. Русский прикрывает их от северных и северо-западных зимних ветров. Здесь сейчас развиты высокосомкнутые широколиственные леса [Ганзей К.С. и др., 20196]. Содержание пыльцы граба (до 24.6 %) в среднеголоценовых палиноспектрах в 4 раза выше, чем в поверхностной пробе (5.6 %). Это подтверждает точку зрения о том, что граб был представлен в лесной растительности островов более широко, чем в континентальной части Приморья [Микишин и др., 2019]. В небольшом количестве в лесах на о. Шкота присутствовала береза. В кустарниковом ярусе встречалась лещина. Пыльца кедра корейского, скорее всего, была занесена ветром. На о. Русский в условиях оптимального потепления хвойно-широколиственные леса занимали только вершины сопок [Микишин и др., 2019]. В илах, накопление которых происходило 6040-4860 кал. л.н., найдена пыльца шелковицы (Morus). Обилие пыльцы шелковицы обнаружено в разрезе палеоозера на берегу бухты Красная, юг о. Русский, 5750-4920 кал. л.н. [Корнюшенко и др., 2019]. Встреченная в изученном разрезе пыльца ольховника, кустарниковой березы, вероятно, переотложена.

Гмелинополынники занимали небольшие участки на склонах и, скорее всего, как и в современных условиях [Ганзей К.С. и др., 20196], тяготели к участкам, обращенным к морю. На скалистых прибрежно-луговых склонах было много лилий, злаковых. По лесным ручьям встречались бальзаминовые (Impatiens), часть видов относится к сорным травам [Недолужко, Денисов, 2001]. В основании склона на сырых участках росла ольха. Низкое содержание трав говорит о том, что аккумулятивная форма только начала зарастать. Здесь преобладали растения, предпочитающие влажные местообитания. Около озера были представлены осоковые группировки, росли кровохлебка, хвощ, из кустарников – восковник, начал формироваться моховой ярус из сфагнума. Следует отметить, что в настоящее время южная точка произрастания восковника болотного на материковом побережье Азии находится на побережье бухты Кит (севернее 43° с.ш.) [Жудова, 1967], расположенной в 200 км к северовостоку от исследуемого района. На влажных лугах встречались злаки, зонтичные, гречишные, горечавки.

Климат был намного теплее и влажнее современного. Среднегодовая температура на островах в оптимальную фазу среднего голоцена (6600–6400 кал. л.н.) оценивается на 4–6 °С выше современных значений, суммы осадков от 900–1200 мм/год [Короткий и др., 1997] до 1100–1600 мм/год [Микишин и др., 2019]. Реконструкции на глобальном уровне предполагают, что температуры были на 2 °С выше современных [Величко, 2012], что представляется более реалистичным. Эффект потепления на островах мог усиливаться влиянием теплого течения, которое было более интенсивным в этот период [Lutaenko et al., 2007].

Климатическая ритмика в первой половине позднего голоцена (до 1840 кал л.н.) не оказала существенного влияния на развитие многопородных широколиственных лесов на острове (палинозона 2). Выделение двух морфотипов пыльцы Quercus позволяет предположить, что в лесах было два вида дубов. В обилии рос калопанакс (Kalopanax), появилась яблоня. Более разнообразным стал подлесок, наряду с лещиной росли калина, сирень, боярышник. В травяном покрове стало много папоротников. Возможно, на скалах рос можжевельник. Можно отметить лишь некоторое уменьшение роли граба. Его участие в лесной растительности резко снизилось (Carpinus - 16.3 %) в похолодание на границе среднего и позднего голоцена (5460-4860 кал. л.н.). Это событие не проявилось ярко на близлежащих малых островах, где были распространены широколиственные леса богатого видового состава (около 4470 ± 140 л.н., 5120 ± 190 кал. л.н., ЛУ-7528) [Лящевская, 2015].

В потепление, сопоставляемое с оптимумом суббореала (4860–3650 кал. л.н.), на о. Шкота граб стал более распространен (*Carpinus* – до 18.8 %). Теплые и влажные условия были благоприятны для ясеня (*Fraxinus* – до 6.9 %). В более прохладных условиях около 3050 кал. л.н. роль граба вновь снижается (*Carpinus* <13.7 %). В палиноспектрах стало меньше и пыльцы широколиственных (<65.5 %). Смена широколиственных сообществ на березово-широколиственные зафиксирована в похолодание 3.5–3.0 тыс. л.н. и на других островах зал. Петра Великого [Лящевская, 2015]. В горах этот рубеж датирован около 3010 кал. л.н. [Разжигаева и др., 2016; 2019]. На о. Русский уменьшение роли широколиственных лесов установлено в похолодание около 2700 кал. л.н. [Микишин, Гвоздева, 2014].

С 3050 кал. л.н. в составе растительности о. Шкота стала принимать участие сосна густоцветковая (Pinus s/g Diploxylon – до 6.4 %), что особенно ярко демонстрируется в палиноспектрах, полученных из почвенных профилей в центральной части острова [Родникова и др., 2012; Лящевская, 2015]. Более интенсивным стал занос пыльцы кедра корейского с о. Русский и материковой части. На болоте в кустарниковом ярусе помимо восковника появилась спирея, возможно, присутствовала береза овальнолистная (Betula ovalifolia). Среди травянистых были распространены бобовые, василистник, стало много гречишных, на сырых лугах – горцов (Polygonum sect. Persicaria), рос дербенник. На песчаных участках аккумулятивной формы мог расти хвойник (Ephedra), сообщества которого отмечены на юге о. Русский и других островах зал. Петра Великого [Лящевская, 2015; Корнюшенко и др., 2019]. В петрофильных группировках и на береговых скалах росли маревые, толстянковые, капустные, возможно, бриевый мох энкалипта скрученная (Encalypta streptocarpa Hedw.).

Наличие мелких углей свидетельствует, что около 3650–1840 кал. л.н. регулярно стали проходить палы, возможно антропогенного происхождения. Признаком антропогенного влияния на ландшафты являются находки пыльцы конопли (*Cannabis sativa*), культурных злаков (>30 мкм) и шелковицы. Время образования отложений (4260–3650 кал. л.н.; 3050–1840 кал. л.н.) отвечает позднему неолиту и раннему железному веку. Археологические памятники этого возраста широко представлены на о. Русский [Попов, Лазин, 2011; Батаршев и др., 2011].

Среди непыльцевых палиноморф встречена *Риссіпіа*, что говорит о широком распространении ржавчины на растениях во влажных условиях (4860–3650 кал. л.н.). Ее развитию, видимо, способствовали частые туманы [Васильева, 1953]. Есть сведения о развитии ржавчинных грибов

(4920–3840 кал. л.н.) на юге о. Русский (бухта Красная) [Корнюшенко и др., 2019].

В условиях снижения температур (около 1840 кал. л.н.) в лесной растительности о. Шкота (палинозона 3) существенно увеличилась роль березы даурской (Betula davurica). Стала более распространена сосна густоцветковая, и, вероятно, в этот период на острове появился кедр корейский (Pinus s/g Haploxylon – 4.6 %). В сырых лесах или на открытых местах рос гроздовник. На скалах появился плаунок (Selaginella). На морском берегу было много торичника (Spergularia). В палиноспектрах появилась пыльца подорожниковых, характерных для современных группировок пересыпи [Ганзей К.С. и др., 20196]. Отмеченная в спектрах пыльца Clevera могла быть занесена с юга тайфунами.

Вышеизложенные результаты хорошо сопоставляются с данными по другим островам: похолодание 1820–1440 кал. л.н. было рубежом, существенно изменившим состав растительных сообществ островов Путятин, Рикорда, доминирующую роль стали играть березово-широколиственные леса, гмелинополынники, появилась кустарниковая береза [Лящевская, 2015].

Вспышка развития кедра корейского была в малый оптимум голоцена, что характерно и для других районов Приморья [Razjigaeva et al., 2019b]. Под хвойно-широколиственными лесами в подлеске могла расти вейгела ранняя. В более теплых влажных условиях около 890-680 кал. л.н. стало больше граба (Carpinus - до 13.2%), ореха маньчжурского,ясеня. Увеличение роли широколиственных пород в конце малого оптимума зафиксировано на о. Русский, побережье п-ова Муравьева-Амурского и в горных районах Приморья [Микишин, Гвоздева, 2014; Лящевская и др., 20176; Razjigaeva et al., 2019 a, b]. В кустарниковом ярусе широколиственных лесов были широко представлены жимолости, бересклет, леспедеца. В папоротниковом покрове было много чистоустника коричного (Osmunda cinnamomea), характерного для влажных лесов [Недолужко, Денисов, 2001]. В составе луговой растительности и зарослях кустарников стало много мареновых

(Rubiaceae – 4 %). Подмаренник настоящий (*Galium verum* L.) распространен в современных петрофитных группировках [Ганзей К.С. и др., 20196].

Среднегодовая температура повысилась на 1–1.3 °С, увеличилось количество атмосферных осадков [Razjigaeva et al., 2019b]. Для Япономорского региона в 750–1200 гг. н. э. отмечено усиление летнего муссона и ослабление зимнего [Yamada et al., 2010].

Резкое увеличение в палиноспектрах доли пыльцы трав показывает, что аккумулятивная форма начала активно зарастать около 890 кал. л.н. в условиях снижения уровня моря. Пыльца травянистых растений суммарно характеризует изменения в травяном покрове разных типов растительности. В палиноспектрах появилась пыльца колокольчиковых, распространенных как в лесах, на опушках, так и в гмелинополынниках и на лугах; норичниковых и гвоздиковых, также характерных для гмелинополынников и лугов. Найдена пыльца девясила (Inula), распространенного в зарослях кустарников и на сырых лугах. В палиноспектрах стало больше пыльцы бобовых, типичных для приморских песков и галечников [Недолужко, Денисов, 2001]. Среди мезофитных лугов мог расти мазус, в Приморье встречаются два вида: японский – Mazus japonicus (Thunb.) Kuntze и чистецолистный M. stachydifolius (Turcz.) Maxim, в настоящее время на островах они не обнаружены. На влажных местах стали распространены лютиковые, дербенник (Lythrum), который мог расти и на берегу озера. Локально около болота развивались плауны. В малый оптимум голоцена сократилось участие березы овальнолистной, исчез восковник.

Признаками антропогенного влияния на растительность являются находки пыльцы культурных злаков (>30 мкм) в отложениях, накопление которых происходило 1840–1240 и 890–790 кал. л.н. Обращает внимание, что для первого временного интервала характерна пыльца яблони, сливы, шелковицы и принсепии китайской (*Princepia sinensis*), которую рассматривают как остаток земледельческих культур [Бромлей и др., 1977]. Яблоки-дички традиционно использовались древним населением Приморья [Вострецов, 2009]. Для второго периода зафиксирована пыльца дурнишника (Xanthium), сорного растения, растущего сейчас на о. Русский по обочинам дорог [Недолужко, Денисов, 2001]. Находки пыльцы Xanthium в культурных слоях археологических стоянок считаются свидетельством сельскохозяйственной деятельности [Jia, 2005]. Есть и пыльца шелковицы (до 3.6%), цикориевых. Первый период захватывает конец кроуновской культуры и мохэ, второй – чжурчжэньскую эпоху [Кузьмин и др., 2005]. Археологические памятники раннего железного века и раннего средневековья (мохэ) известны на о. Русский [Попов, Лазин, 2011; Крупянко и др., 2016]. На о. Шкота или на ближайшем берегу о. Русский тоже могут быть археологические памятники этого возраста. Возможно, резкое сокращение пыльцы древесных (18.5-33.1 %) последние 790 лет также связано с антропогенным влиянием и частичным уничтожением леса.

В первую половину малого ледникового периода (680-340 кал. л.н.) на о. Шкота увеличились площади, занятые сосной густоцветковой (палинозона 4). Кедр корейский если и был, то в небольшом количестве. Широколиственные леса занимали ограниченные участки, в их составе резко сократилось участие граба (*Carpinus* <7.3 %), ясеня, лещины. Получила распространение береза ребристая, сейчас растущая на о. Русский в смешанных лесах на северных склонах [Недолужко, Денисов, 2001]. В подлеске произрастало много бересклета, на осветленных участках – аралии, по каменистым склонам – вейгелы. На влажных скалах появилась деннштедтия и плаунок. На аккумулятивной форме большее распространение получила береза овальнолистная. Около зарастающего озера развивалось тростниково-осоковое болото с обилием кровохлебки, ирисами, с хорошо выраженным ярусом из сфагновых мхов. Присутствие пыльцы росянки характеризует олиготрофную стадию развития болота. В составе трав появились сложноцветные, яснотковые.

Находки мелких углей фиксируют пожар около 730 \pm 70 л.н., 680 \pm 60 кал. л.н. (ЛУ– 9256), сильно повредивший заросли гмелинополынников – содержание пыльцы Artemisia существенно сократилось. В холодных влажных условиях около 560–450 кал. л.н. на растениях вновь развивалась ржавчина. В торфе этого возраста обнаружено много пыльцы культурных злаков, есть пыльца груши (*Pyrus*). Эпизодическое присутствие пыльцы буддлеи (*Buddleja*) можно объяснить ее заносом тайфунами.

Во второй половине малого ледникового периода древесная растительность становится более разреженной. Хвойных пород на острове стало больше, увеличилась роль как сосны густоцветковой, так и кедра корейского. Рост количества пыльцы Pinus s/g Diploxylon зафиксирован и в палиноспектрах из верхней части почвенных профилей [Родникова и др., 2012; Лящевская, 2015]. Кедр корейский стал более распространен на юге о. Русский последние 360 кал. лет [Корнюшенко и др., 2019]. Более активно в отложения палеоозера происходил ветровой занос пыльцы пихты, что отвечает ее распространению на о. Русский [Ганзей К.С. и др., 2019а]. В широколиственных лесах дуб становится доминантом. Резкое увеличение пыльцы березы даурской, наряду с резким снижением доли широколиственных, особенно граба (*Carpinus* -1.9 %), и преобладанием дуба среди широколиственных, по-видимому, отвечает кратковременному холодному эпизоду. На влажных участках встречалась в обилии смородина, на влажных лугах – дербенник (Lythrum). Около озера было развито тростниково-осоковое болото со сфагновыми мхами.

Спорово-пыльцевые спектры из поверхностного слоя торфа отвечают современной ландшафтной ситуации на острове с ограниченным распространением широколиственных лесов с преобладанием дуба монгольского и берез, развитием травянистых сообществ и кустарниковых группировок. Палиноспектры свидетельствуют, что сосна густоцветковая, которая сейчас встречается единично [Ганзей К.С. и др., 20196], еще недавно (повидимому, до начала строительства на прилегающей территории) была более распространена – доля ее пыльцы составляет 11.5 %. На аккумулятивной форме около озера сократилось разнообразие трав, стали преобладать злаки (тростник), осоковые, появилось много зонтичных и крестоцветных. В палиноспектрах появилась пыльца фиалки. Из непыльцевых палиноморф встречены споры грибов *Gelasinospora* – индикаторов пожаров [Shumilovskikh et al., 2015]. Частые низовые пожары могли послужить причиной сокращения гмелинополынников – доля пыльцы полыни резко уменьшилась (до 9.4 %).

Выводы

На о. Шкота обнаружено палеоозеро, образовавшееся в результате интенсивного развития аккумулятивных процессов в области волновой тени и роста томболо со второй половины среднего голоцена. Несмотря на небольшой размер, водоем существовал длительное время и прошел несколько стадий развития от распресненной лагуны до пресноводного озера, которое начало интенсивно зарастать около 1240 кал. л.н. С этого времени началось органогенное осадконакопление. Торфяник по его обрамлению начал формироваться в малый оптимум голоцена, процессы заболачивания и зарастания усилились в малый ледниковый период, особенно в кратковременный сухой эпизод (~340-230 кал. л.н.), некоторое обводнение болота последние 200 лет отвечает тенденции к увеличению количества атмосферных осадков в условиях потепления.

Периодическое поступление в водоем морских вод связано со штормовой активностью и, возможно, с цунами. Как правило, заплеск морской воды был более интенсивным во время малоамплитудных трансгрессий. В озере была развита разнообразная водная растительность, ее состав свидетельствует, что большую часть года водоем был пресноводным, часто с застойным режимом.

В оптимум голоцена на острове были распространены дубово-грабовые леса богатого видового состава. Участие граба было более высоким, чем в позднем голоцене. Климатическая ритмика в первой половине позднего голоцена не оказала существенного влияния на развитие многопородных широколиственных лесов. Постепенно участие граба сократилось, стало больше берез. Сосна густоцветковая появилась около 3050 кал. л.н., а кедр корейский – около 1840 кал. л.н., он наиболее распространен в малый оптимум голоцена. Древесная растительность деградировала в малый ледниковый период, аккумулятивная форма начала быстро зарастать, состав трав стал более разнообразным.

Выявлены признаки антропогенного влияния на растительность, по-видимому связанные с заселением острова и деятельностью древнего человека, начиная около 4.2–3.6 тыс. кал. л.н. Об этом свидетельствует присутствие в спорово-пыльцевых спектрах пыльцы конопли, культурных злаков, шелковицы, принсепии китайской, груши, сливы, яблони, дурнишника, цикориевых. Найденные микроугли позволяют восстановить летопись пожаров. Наиболее сильный пожар около 680 кал. л.н. сильно повредил заросли гмелинополынников. Скорее всего, палеопожары имели антропогенную природу и наряду с климатическим фактором могли быть одной из причин снижения залесенности острова.

Список литературы

1. Акуличев В.А., Астахов А.С., Малахов М.И., Аксентов К.И., Карабцов А.А., Марьяш А.А., Алаторцев А.В. **2016**. Первая находка криптотефры катастрофических извержений вулкана Байтоушань Х в.н.э. в шельфовых отложениях Японского моря. *Доклады АН*, 469(6): 734–738. https://doi.org/10.7868/S0869565216240166

2. Балашова Н.Б, Киселев Г.А., Степанова В.А., Тобиас А.В. **2016**. Диатомовые водоросли бентоса южного побережья Финского залива (заказник «Лебяжий»). Вестник СПбГУ, Сер. 3, Биология, (4): 9–25. https://doi.org/10.21638/11701/spbu03.2016.401

3. Батаршев С.В., Якупов М.А., Дорофеева Н.А. **2011**. Археология островов Южного архипелага. В кн.: Дальний Восток России в древности и средневековье. Проблемы, поиски, решения. Владивосток: ООО Рея, 41–48.

4. Бегун А.А., Масленников С.И., Крючкова А.Б. **2011**. Диатомовые водоросли эпифитона бурой водоросли *Sargassum pallidum* (Turner) С. Agardh в бухте Тихая Заводь (залив Восток, Японское море). *Научные труды Дальрыбвтуза*, (24): 13–19.

5. Борзова Л.М., Семкин Б.И., Ковалюх Н.Н. **1981**. Развитие островных растительных сообществ в голоцене (на примере острова Большой Пелис). В кн.: *Развитие природной среды в плейстоцене (юг Дальнего Востока)*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 127–134.

6. Бромлей Г.Ф., Васильев Н.Г., Харкевич С.С., Нечаев В.А. **1977**. *Растительный и животный мир Уссурийского заповедника*. М.: Наука, 173 с.

7. Васильева Л.Н. **1953**. Ржавчина хлебных злаков на Дальнем Востоке и борьба с ней. *Комаровские чтения*, 3: 23–42.

8. Величко А.А. 2012. Эволюционная география: проблемы и решения. М.: ГЕОС, 563 с.

9. Вострецов Ю.Е. **2009**. Первые земледельцы на побережье залива Петра Великого. Вестник *НГУ*, Серия История, Филология, 8(3): 113–120.

10. Ганзей К.С., Киселёва А.Г., Пшеничникова Н.Ф., Лящевская М.С., Родникова И.М., Ухваткина О.Н., Юрченко С.Г. **2019а**. Геоэкологическое состояние посадок пихты цельнолистной и их роль в восстановлении хвойно-широколиственных геосистем о. Русский. *География и природные ресурсы*, 2: 59–68.

11. Ганзей К.С., Киселёва А.Г., Пшеничникова Н.Ф., Родникова И.М. **20196**. Геоэкологический анализ ландшафтов острова Шкота (Японское море). *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеолосия, геокриология,* **3**: 63–74. https://doi.org/10.31857/S0869-78092019363-74

12. Ганзей К.С., Жариков В.В., Пшеничникова Н.Ф., Лебедев А.М., Киселева А.Г. **2019в**. Ландшафтная организация береговой геоструктуры острова Шкота (залив Петра Великого). В кн.: *Геосистемы восточных районов России: особенности их структур и пространственного развития*. Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 52–59. https://doi.org/10.35735/tig.2019.65.23.006

13. Ганзей Л.А., Разжигаева Н.Г., Нишимура Ю., Гребенникова Т.А., Кайстренко В.М., Горбунов А.О., Арсланов Х.А., Чернов С.Б., Наумов Ю.А. **2015**. Осадки исторических и палеоцунами на побережье Восточного Приморья. *Тихоокеанская геология*, 34(1): 79–95.

14. Ганзей Л.А., Разжигаева Н.Г., Гребенникова Т.А., Арсланов Х.А., Иванова Е.Д., Ганзей К.С. **2016.** Проявление исторических цунами на о. Русский, Японское море. *Успехи современного естествознания*, 5: 116–124.

15. Гричук В.П. **1940**. Методика обработки осадочных пород, бедных органическими остатками, для целей пыльцевого анализа. *Проблемы физической географии*, 8: 53–58.

16. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. 1974. Л.: Наука, 400 с.

17. Жудова П.П. **1967.** Растительность и флора Судзухинского государственного заповедника Приморского края. *Труды Сихотэ-Алинского государственного заповедника*, 4: 1–306 с.

18. Корнюшенко Т.В., Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Ганзей К.С., Кудрявцева Е.П. **2019**. Запись климатических и антропогенных изменений ландшафтов среднего-позднего голоцена в лагунных отложениях острова Русский (Приморье). *Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием «Динамика экосистем в голоцене»*. М.: Медиа-ПРЕСС, 149–151.

19. Короткий А.М., Гребенникова Т.А., Пушкарь В.С., Разжигаева Н.Г., Волков В.Г., Ганзей Л.А., Мохова Л.М., Базарова В.Б., Макарова Т.Р. **1997**. Климатические смены на территории юга Дальнего Востока в позднем плейстоцене-голоцене. *Вестник ДВО РАН*, 3: 121–143.

20. Красная книга Приморского края: Растения. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов. **2008**. Владивосток: АВК «Апельсин», 688 с.

21. Крестов П. В., Верхолат В.П. **2003**. *Редкие растительные сообщества Приморья и Приамурья*. Владивосток: ДВО РАН, 200 с.

22. Крупянко А.А., Пискарева Я.Е., Раков В.А., Глухов А.В. **2016**. Местонахождение Новик-V. Раковинная куча мохэского времени. *Россия и АТР*, 4: 34–48.

23. Кузьмин Я.В., Болдин В.И., Никитин Ю.Г. **2005**. Хронология раннего железного века и средневековья Приморья. *Россия и ATP*, 4: 44–55.

24. Лящевская М.С. **2015**. Динамика растительного покрова островов залива Петра Великого. Известия РАН. Сер. географическая, 3: 143–50. https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-3-121-128

25. Лящевская М.С., Ганзей К.С., Макарова Т.Р. **2017а.** Реконструкция палеоусловий острова Стенина (Японское море) в среднем-позднем голоцене. *Биота и среда заповедников Дальнего Востока. Biodiversity and Environment of Far East Reserves*, 2(11): 3–20.

26. Лящевская М.С., Макарова Т.Р., Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Кудрявцева Е.П., Паничев А.М., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Петров А.Ю. **20176.** Развитие ландшафтов полуострова Муравьева-Амурского в среднем-позднем голоцене по данным изучения отложений побережья бухты Муравьиная (Южное Приморье). *Успехи современного естествознания*, 2: 110–122.

27. Микишин Ю.А, Гвоздева И.Г. **2014**. Палеосреда острова Русский (Южное Приморье) в среднем-позднем голоцене. *Фундаментальные исследования*, 3-3: 516–522.

28. Микишин Ю.А, Петренко Т.И., Гвоздева И.Г. **2019**. Поздняя фаза атлантического периода голоцена на юге Приморья. *Успехи современного естествознания*, 12: 96–107.

29. Недолужко В.А., Денисов Н.И. 2001. Флора сосудистых растений острова Русский (залив Петра Великого в Японском море). Владивосток: Дальнаука, 98 с.

30. Покровская И.М. **1966**. Методика камеральных работ. В кн.: *Палеопалинология*. Л.: Недра, т. 1: 32-61.

31. Попов А.Н., Лазин Б.В. **2011**. Археологические исследования на острове Русский в 2010–2011 годах. *Древности по обе стороны Великого океана*. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 118–126.

32. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Мохова Л.М., Макарова Т.Р., Паничев А.М., Кудрявцева Е.П., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Старикова А.А. **2016**. Развитие ландшафтов Шкотовского плато Сихотэ-Алиня в позднем голоцене. *Известия РАН. Серия географическая*, 3: 65–80. https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-3-65-80

33. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Копотева Т.А., Кудрявцева Е.П., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Петров А.Ю., Климин М.А. **2019**. Развитие природной среды среднегорья Южного Сихотэ-Алиня, запечатленное в разрезах торфяников Сергеевского плато. *Тихоокеанская геология*, 38(1): 13–31. doi.org/0.30911/0207-4028-2019-38-1-13-31

34. Родникова И.М., Лящевская М.С., Киселева А.Г., Пшеничникова Н.Ф. **2012**. Состояние и динамика почвенно-растительного покрова малых островов залива Петра Великого (Японское море). *География и природные ресурсы*, 1: 96–103.

35. Сахно В.Г. **2007**. Вулкан Пектусан: хронология извержений, состав и эволюция магм на основе К–Аг-датирования и изотопов ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr и δ¹⁸O. *Доклады АН*, 412(2): 226–233.

36. Сергушева Е.А., Рябогина Н.Е., Лящевская М.С., Гольева А.А. **2016**. Аргументация земледелия на археологических памятниках Приамурья и Приморья: результаты применения палеоботанических методик. *Вестник TTV*, 402: 99–108. https://doi.org/10.17223/15617793/402/14

37. Стратиевский О.Б. **2012**. *Русский – остров архипелага Императрицы Евгении*. Владивосток: Изд. дом ДВФУ, 704 с.

38. Харитонов В.Г. **2010**. Конспект флоры диатомовых водорослей (Bacillariophyceae) Северного Охотоморья. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 189 с.

39. Цой И.Б., Обрезкова М.С. 2017. Атлас диатомовых водорослей и силикофлагеллат голоценовых осадков морей Восточной Арктики России. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 146 с.

40. Bronk Ramsey C. 2017. Methods for summarizing radiocarbon datasets. *Radiocarbon*, 59(2): 1809–1833. https://doi.org/10.1017/rdc.2017.108

41. Buczkó K. 2007. The occurrence of the epiphytic diatom *Lemnicola hungarica* on different European Lemnaceae species. *Fottea*, 7(1): 77–84. https://doi.org/10.5507/fot.2007.007

42. Chen X-Y., Blockley S.P.E., Tarasov P.E., Xu Y.-G., McLean D., Tomlinson E.L., Albert P.G., Liu J.-Q., Müller S., Wagner M., Menzies M.A. **2016**. Clarifying the distal to proximal tephrochronology of the Millennium (B-Tm) eruption, Changbaishan Volcano, northeast China. *Quaternary Geochronology*, 33: 61–75. https://doi.org/10.1016/j.quageo.2016.02.003

Grimm E. 2004. *Tilia software 2.0.2*. Springfield: Illinois State Museum Research and Collection Center.
Iida K. 1984. *Catalog of tsunamis in Japan and its neighboring countries*. Toyota: Aichi Institute of Technology, 52 p.

45. Jia W. 2005. Transition from Foraging to Farming in Northeast China. (PhD thesis). Sydney: University of Sydney.

46. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1986.** *Bacillariophyceae*. Teil 1. *Naviculaceae*. Jena: Gustav Fischer Verlag, 876 p. (In: Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (eds) Süsswasserflora von Mitteleuropa; 2).

47. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1988**. *Bacillariophyceae*. Teil 2. *Bacillariaceae*, *Epithemiaceae*, *Surirellaceae*. Jena: Gustav Fischer Verlag, 536 p.

48. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1991**. *Bacillariophyceae*. Teil 3. *Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae*. Jena: Gustav Fischer Verlag. 576 p.

49. Lutaenko K.A., Zhushchikhovskaya I.S., Mikishin Yu.A., Popov A.N. **2007**. Mid-Holocene climatic changes and cultural dynamics in the basin of the Sea of Japan and adjacent areas. *Climate Change and Cultural Dynamics: A Global Perspective on Mid-Holocene Transitions*. Amsterdam: Elsevier, 331–406. https://doi.org/10.1016/b978-012088390-5.50015-7

50. McLean D., Albert P.G., Nakagawa T., Staff R.A., Suzuki T., Suigetsu 2006 Project Members, Smith V.C. **2016**. Identification of the Changbaishan 'Millennium' (B-Tm) eruption deposit in the Lake Suigetsu (SG06) sedimentary archive, Japan: synchronisation of hemispheric-wide palaeoclimate archives. *Quaternary Science Review*, 150: 301–307. https://doi.org/ 10.1016/j.quascirev.2016.08.022

51. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Lyaschevskaya M.S., Makarova T.R., Kudryavtseva E.P., Grebennikova T.A., Panichev A.M., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu., Malkov S.S. **2019a**. Climatic and human impacts on landscape development of the Murav'ev Amursky Peninsula (Russian South Far East) in the Middle/Late Holocene and historical time. *Quaternary International*, 516: 127–140. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.007

52. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Bazarova V.B., Arslanov Kh.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Belyanina N.I., Lyaschevskaya M.S. **2019b**. Landscape response to the Medieval Warm Period in the South Russian Far East. *Quaternary International*, 519: 215–231. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.12.006

53. Shevchenko O.G., Orlova T.Yu., Herna'ndez-Becerril D.U. **2006**. The genus Chaetoceros (Bacillariophyta) from Peter the Great Bay, Sea of Japan. *Botanica Marina*, 49: 236–258. https://doi.org/10.1515/bot.2006.028

54. Shumilovskikh L.S., Schlütz F., Achterberg I., Bauerochse A., Leuschner H.H. **2015**. Non-pollen palynomorphs from mid-Holocene peat of the raised bog Borsteler moor (lower Saxony, Germany). *Studia Quaternaria*, 32(1): 5–18. https://doi.org/10.1515/squa-2015-0001

55. Yamada K., Kamite M., Saito-Kato M., Okuno M., Shinozuka Y., Yasuda Y. **2010**. Late Holocene monsoonal-climate change inferred from Lakes Ni-no-Megata and San-no-Megata, northeastern Japan. *Quaternary International*, 220: 122–132. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.09.006

Об авторах

РАЗЖИГАЕВА Надежда Глебовна (ORCID 0000-0001-7936-1797), доктор географических наук, главный научный сотрудник, ГАНЗЕЙ Лариса Анатольевна (ORCID 0000-0002-2538-6603), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, МАКАРОВА Татьяна Ростиславовна (ORCID 0000-0003-2412-8714), кандидат географических наук, старший научный сотрудник, КОРНЮШЕНКО Татьяна Валерьевна (ORCID 0000-0001-5750-9762), ведущий инженер – лаборатория палеогеографии и геоморфологии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН; КУДРЯВЦЕВА Екатерина Петровна (ORCID 0000-0003-4135-8300), старший научный сотрудник – лаборатория биогеографии и экологии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН; СУДЬИН Владислав Витальевич (ORCID 0000-0001-9091-855Х), младший научный сотрудник – лаборатория качества и надежности материалов для газопроводов и оборудования газовых месторождений, Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН; ХАРЛАМОВ Андрей Александрович (ORCID 0000-0003-2623-5388), ведущий инженер – лаборатория пунами, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

References

1. Akulichev V.A., Astakhov A.S., Malakhov M.I., Aksentov K.I., Karabtsov A.A., Mar'yash A.A., Alatortsev A.V. **2016**. The first discovery of cryptotephra of the catastrophic eruptions of the Baitoushan volcano in the tenth century A.D. in the shelf deposits of the Sea of Japan. *Doklady Earth Sciences*, 469(2): 887–891. https://doi.org/10.1134/s1028334x16080201

2. Balashova N.B., Kiselev G.A., Stepanova V.A., Tobias A.V. Benthic diatoms of the southern coast of the Gulf of Finland (Lebyazhiy nature reserve). **2016**. *Vestnik of St Petersburg University, Series 3, Biology*, 4: 9–25. (In Russ.). https://doi.org/10.21638/11701/spbu03.2016.401

3. Batarshev S.V., Iakupov M.A., Dorofeeva N.A. **2011**. Arkheologiia ostrovov Iuzhnogo arkhipelaga [Archeology of the islands of Southern archipelago]. In: *Dal'nii Vostok Rossii v drevnosti i srednevekov'e. Problemy, poiski, resheniia* [*Russian Far East in ancient and medieval times. Problems, searches, solutions*]. Vladivostok: OOO Reia, 41–48. (In Russ.).

4. Begun A.A., Maslennikov S.I., Kriuchkova A.B. **2011**. [Diatoms of the epiphyton of *Sargassum pallidum* (Turner) C. Agardh kelp in the Tikhaya zavod' Bay (Vostok Bay, Sea of Japan)]. *Nauchnye trudy Dal'rybvtuza* [*Scientific transactions of the Far Eastern State Technical Fisheries University*], 24: 13–19. (In Russ.).

5. Borzova L.M., Semkin B.I., Kovaliukh N.N. **1981**. Razvitie ostrovnykh rastitel'nykh soobshchestv v golotsene (na primere ostrova Bol'shoi Pelis) [Development of insular plant associations in the Holocene (by the example of Big Pelis Island)]. In: *Razvitie prirodnoi sredy v pleistotsene (iug Dal'nego Vostoka)* [*Pleistocene development of the natural environment (the South of the Far East)*]. Vladivostok: DVNTs AN SSSR [Far Eastern Scientific Center of the USSR AS], 127–134. (In Russ.).

6. Bromlei G.F., Vasil'ev N.G., Kharkevich S.S., Nechaev V.A. **1977**. [*Flora and fauna of the Ussuriysk Nature Reserve*]. Moscow: Nauka, 173 p. (In Russ.).

7. Bronk Ramsey C. **2017**. Methods for summarizing radiocarbon datasets. *Radiocarbon*, 59(2): 1809–1833. https://doi.org/10.1017/rdc.2017.108

8. Buczkó K. **2007**. The occurrence of the epiphytic diatom *Lemnicola hungarica* on different European Lemnaceae species. *Fottea*, 7(1): 77–84. https://doi.org/10.5507/fot.2007.007

9. Chen X-Y., Blockley S.P.E., Tarasov P.E., Xu Y.-G., McLean D., Tomlinson E.L., Albert P.G., Liu J.-Q., Müller S., Wagner M., Menzies M.A. **2016**. Clarifying the distal to proximal tephrochronology of the 'Millennium' (B-Tm) eruption, Changbaishan Volcano, northeast China. *Quaternary Geochronology*, 33: 61–75. https://doi.org/10.1016/j.quageo.2016.02.003

10. Diatomovye vodorosli SSSR (iskopaemye i sovremennye) [Diatoms of the USSR (fossil and modern)]. Vol. 1. **1974**. Leningrad: Nauka, 400 p. (In Russ.).

11. Ganzei K.S., Kiselyova A.G., Pshenichnikova N.F., Lyashchevskaya M.S., Rodnikova I.M., Ukhvatkina O.N., Yurchenko S.G. **2019a.** The geoecological status of *Abies holophylla* plantations and their role in the restoration of coniferous-broadleaved geosystems of Russky Island. *Geografiia i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*, 2: 59–68. https://doi.org/10.21782/gipr0206-1619-2019-2(59-68)

12. Ganzei K.S., Kiseleva A.G., Pshenichnikova N.F., Rodnikova I.M. **2019b**. Geoekologicheskii analiz landshaftov ostrova Shkota (Iaponskoe more) [Geoecological analysis of Shkot Island (the Sea of Japan) landscapes]. *Geoekologiia, inzhenernaia geologiia, gidrogeologiia, geokriologiia* [*Geoecology, Engineering geology, Hydrogeology, Geocryology*], 3: 63–74. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/s0869-78092019363-74

13. Ganzei K.S., Zharikov V.V., Pshenichnikova N.F., Lebedev A.M., Kiseleva A.G. **2019c**. Landshaftnaia organizatsiia beregovoi geostruktury ostrova Shkota (zaliv Petra Velikogo) [Landscape arrangement of the coastal geostructure of Shkot Island (Peter the Great Bay)]. In: *Geosistemy vostochnykh raionov Rossii: osobennosti ikh struktur i prostranstvennogo razvitiia* [Geosystems of the eastern areas of Russia: peculiarities of their structures and spatial development]. Vladivostok: TIG DVO RAN [PGI FEB RAS], 52–59. https://doi.org/10.35735/tig.2019.65.23.006 (In Russ.).

14. Ganzei L.A., Razjigaeva N.G., Nishimura Yu., Grebennikova T.A., Kaistrenko V.M., Gorbunov A.O., Arslanov Kh.A., Chernov S.B., Naumov Yu.A. **2015.** Historical and paleo-tsunami deposits of the Eastern Primorye coast. *Russian J. of Pacific Geology*, 9(1): 64–79. https://doi.org/10.1134/s1819714015010029

15. Ganzey L.A., Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Arslanov Kh.A., Ivanova E.D., Ganzey K.S. **2016.** Manifestation of historical tsunami on Russian Island, Sea of Japan. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia* [Successes of the Modern Natural Science], 5: 116–124. (In Russ.).

16. Grichuk V.P. **1940**. Metodika obrabotki osadochnykh porod, bednykh organicheskimi ostatkami, dlia tselei pyl'tsevogo analiza [Methods of treatment of the sedimentary rocks, poor in organic remains, for the purposes of pollen analysis]. *Problemy fizicheskoi geografii* [*Physical Geography Problems*], 8: 53–58. (In Russ.).

17. Grimm E. 2004. Tilia software 2.0.2. Springfield: Illinois State Museum Research and Collection Center.

18. Iida K. 1984. Catalog of tsunamis in Japan and its neighboring countries. Toyota: Aichi Institute of Technology, 52 p.

19. Jia W. 2005. Transition from Foraging to Farming in Northeast China. (PhD thesis). Sydney: University of Sydney.

20. Kharitonov V.G. **2010**. Konspekt flory diatomovykh vodoroslei (Bacillariophyceae) Severnogo Okhotomor'ia [Summary of the diatom flora (Bacillariophyceae) of the Northern coast of the Okhotsk Sea]. Magadan: SVNTs DVO RAN [NESC FEB RAS], 189 p.

21. Kornyushenko T.V., Razjigaeva N.G., Ganzei L.A., Grebennikova T.A., Ganzei K.S., Kudryavtseva E.P. **2019**. Zapis' klimaticheskikh i antropogennykh izmenenii landshaftov srednego-pozdnego golotsena v lagunnykh otlozheniiakh ostrova Russkii (Primor'e) [Record of climatic and anthropogenic changes of the landscapes of late Holocene in the lagoonal deposits of Russky Island (Primorye)]. In: *Materialy* V Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Dinamika ekosistem v golotsene" [Proceedings of the fifth All-Russian scientific conference with international participation "The dynamics of ecosystems in the Holocene"]. Moscow: Media-PRESS, 149–151. (In Russ.).

22. Korotkii A.M., Grebennikova T.A., Pushkar' V.S., Razjigaeva N.G., Volkov V.G., Ganzei L.A., Mokhova L.M., Bazarova V.B., Makarova T.R. **1997**. [Climatic changes of the territory of Southern Far East in the late Pleistocene-Holocene]. *Vestnik DVO RAN* = *Vestnik of the Far East Branch of RAS*, 3: 121–143. (In Russ.).

23. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1986.** *Bacillariophyceae*. Teil 1: *Naviculaceae*. Jena: Gustav Fischer Verlag, 876 p. (In: Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (eds) Süsswasserflora von Mitteleuropa; 2).

24. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1988**. *Bacillariophyceae*. Teil 2. *Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*. Jena: Gustav Fischer Verlag, 536 p.

25. Krammer K., Lange-Bertalot H. **1991**. *Bacillariophyceae*. Teil 3. *Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae*. Jena: Gustav Fischer Verlag. 576 p.

26. Krasnaia kniga Primorskogo kraia: Rasteniia. Redkie i nakhodiashchiesia pod ugrozoi ischeznoveniia vidy rastenii i gribov [Red data book of Primorsky Kray: Plants. Rare and endangered species of plants and fungi]. 2008. Vladivostok: AVK "Apel'sin" ["Apelsin" Publ.], 688 p. (In Russ.).

27. Krestov P. V., Verkholat V.P. **2003**. *Redkie rastitel 'nye soobshchestva Primor 'ia i Priamur 'ia [Rare plants communities of Primorye and Priamurye]*. Vladivostok: DVO RAN [FEB RAS], 200 c. (In Russ.).

28. Krupianko A.A., Piskareva Ia.E., Rakov V.A., Glukhov A.V. Krypianko A.A. **2016**. Novik-V site. Shell mound of Mokhe period. *Rossiia i ATR* = *Russia and the Pacific*, (4): 34–48. (In Russ.).

29. Kuz'min Ia.V., Boldin V.I., Nikitin Iu.G. **2005**. Chronology of Cultures of the Early Iron Age and the Medieval Period of Primorye. *Rossiia i ATR* = *Russia and the Pacific*, (4): 44–55. (In Russ.).

30. Lutaenko K.A., Zhushchikhovskaya I.S., Mikishin Yu.A., Popov A.N. **2007**. Mid-Holocene climatic changes and cultural dynamics in the basin of the Sea of Japan and adjacent areas. *Climate Change and Cultural Dynamics: A Global Perspective on Mid-Holocene Transitions*. Amsterdam: Elsevier, 331–406. https://doi.org/10.1016/b978-012088390-5.50015-7

31. Lyashchevskaya M.S. **2015.** Dynamics of vegetation of the Islands of Peter the Great Bay. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Geographical Series], (3): 121–128. (In Russ.). https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-3-121-128

32. Lyashchevskaya M.S., Ganzei K.S., Makarova T.R. **2017***a*. Paleogeographical reconstruction for Stenina Island (Sea of Japan) during Middle-Late Holocene. *Biodiversity and Environment of Far East Reserves*, 2(11): 3–20.

33. Lyaschevskaya M.S., Makarova T.R., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Kudryavtseva E.P., Panichev A.M., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu. **2017b**. Development of Muravyov-Amursky Peninsula landscapes during Middle-Late Holocene based on research of coast Muravyinaya Bay sediments data. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia* [Successes of the Modern Natural Science], 2: 110–122.

34. McLean D., Albert P.G., Nakagawa T., Staff R.A., Suzuki T., Suigetsu 2006 Project Members, Smith V.C. **2016**. Identification of the Changbaishan 'Millennium' (B-Tm) eruption deposit in the Lake Suigetsu (SG06) sedimentary archive, Japan: synchronisation of hemispheric-wide palaeoclimate archives. *Quaternary Science Review*, 150: 301–307. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.08.022

35. Mikishin Y.A., Gvozdeva I.G. **2014**. Mid to Late Holocene of Russky Island (Southern Primorye). *Fundamental'nye issledovaniia [Basic Researches]*, 3-3: 516–522.

36. Mikishin Yu.A., Petrenko T.I., Gvozdeva I.G. **2019.** Late phase of atlantic period of the Holocene in Southern Primorye (Russian Far East). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia* [Successes of the Modern Natural Science], 12: 96–107.

37. Nedoluzhko V.A., Denisov N.I. **2001**. [Flora of the vascular plants of Russky Island (Peter the Great Bay in Sea of Japan)]. Vladivostok: Dal'nauka [Dalnauka Publ. House], 98 p.

38. Pokrovskaia I.M. **1966**. Metodika kameral'nykh rabot [A technique of cameral works]. In: *Paleopalinologiia* [*Paleopalynology*]. Leningrad: Nedra, vol. 1, 32–61.

39. Popov A.N., Lazin B.V. **2011**. [Archaeological researches on Russky Island in 2010–2011]. In: *Drevnosti po obe storony Velikogo okeana* [*Antiquities on both sides of the Great Ocean*]. Vladivostok: Izd. dom DVFU [FEFU Publ. house], 118–126.

40. RazjigaevaN.G., Ganzey L.A., Mokhova L.M., Makarova T.R., Panichev A.M., Kudryavtseva E.P., Arslanov K.A., Maksimov F.E., Starikoiva A.A. **2016**. The development of landscapes of the Shkotovo Plateau of Sikhote-Alin in the Late Holocene. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Geographical Series*, 3: 65–80. (In Russ.). https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-3-65-80

41. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Lyaschevskaya M.S., Makarova T.R., Kudryavtseva E.P., Grebennikova T.A., Panichev A.M., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu., Malkov S.S. **2019a**. Climatic and human impacts on landscape development of the Murav'ev Amursky Peninsula (Russian South Far East) in the Middle/Late Holocene and historical time. *Quaternary International*, 516: 127–140. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.007

42. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Bazarova V.B., Arslanov Kh.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Belyanina N.I., Lyaschevskaya M.S. **2019b**. Landscape response to the Medieval Warm Period in the South Russian Far East. *Quaternary International*, 519: 215–231. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.12.006

43. Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Kudryavtseva E.P., Kopoteva T.A., Klimin M.A., Arslanov K.A., Maksimov F.E., Petrov A.Y. **2019.** Development of the natural environment of midlands of the Southern Sikhote-Alin recorded in the Sergeev Plateau peat bogs. *Russian J. of Pacific Geology*, 13(1): 11–28. https://doi.org/10.1134/s1819714019010056

44. Rodnikova I.M., Lyashchevskaya M.S., Kiseleva A.G., Pshenichnikova N.F. **2012**. The state and dynamics of the soil-vegetation cover on small islands of the gulf of Peter the Great (the Sea of Japan). *Geography and Natural Resources*, 33(1): 61–66.

45. Sakhno V.G. **2007**. [Pektusan volcano: chronology of eruptions, magmatic composition and evolution on the grounds of K–AR dating and the ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and δ^{18} O isotopes]. *Doklady AN = Doklady Earth Sciences*, 412(2): 226–233. (In Russ.).

46. Sergusheva E.A., Riabogina N.E., Liashchevskaia M.S., Gol'eva A.A. **2016**. Argumentation of agriculture in archaeological sites of Priamurye and Primorye: results of paleobotanical method application. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [*Tomsk State University Journal*], 402: 99–108. (In Russ.). https://doi.org/10.17223/15617793/402/14

47. Shevchenko O.G., Orlova T.Yu., Herna'ndez-Becerril D.U. **2006**. The genus Chaetoceros (Bacillariophyta) from Peter the Great Bay, Sea of Japan. *Botanica Marina*, 49: 236–258. https://doi.org/10.1515/bot.2006.028

48. Shumilovskikh L.S., Schlütz F., Achterberg I., Bauerochse A., Leuschner H.H. **2015**. Non-pollen palynomorphs from mid-Holocene peat of the raised bog Borsteler moor (lower Saxony, Germany). *Studia Quaternaria*, 32(1): 5–18. https://doi.org/10.1515/squa-2015-0001

49. Stratievskii O.B. **2012**. *Russkii – ostrov arkhipelaga Imperatritsy Evgenii* [*Russky – the island of the* archipelago of Empress Eugénie]. Vladivostok: Izd. dom DVFU [FEFU Publ. House], 704 p.

50. Tsoi I.B., Obrezkova M.S. **2017**. Atlas diatomovykh vodoroslei i silikoflagellat golotsenovykh osadkov morei Vostochnoi Arktiki Rossii [Atlas of diatoms and silicoflagellates from Holocene sediments of the Russian East Arctic seas]. Vladivostok: TOI DVO RAN = POI FEB RAS, 146 p.

51. Vasil'eva L.N. **1953**. [The crop plants rust on the Far East and its control]. *Komarovskie chteniia* [Komarov readings], 3: 23–42. (In Russ.).

52. Velichko A.A. **2012**. Evoliutsionnaia geografiia: problemy i resheniia [Evolutionary geography: problems and solutions]. Moscow: GEOS, 563 p. (In Russ.).

53. Vostretsov Yu.E. **2009**. First cultivators in the coast of Peter the Great Bay. *Vestnik NGU, Seriia Istoriia, Filologiia [Vestnik NSU, Series: History and Philology]*, 8(3): 113–120. (In Russ.).

54. Yamada K., Kamite M., Saito-Kato M., Okuno M., Shinozuka Y., Yasuda Y. **2010**. Late Holocene monsoonal-climate change inferred from Lakes Ni-no-Megata and San-no-Megata, northeastern Japan. *Quaternary International*, 220: 122–132. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.09.006

55. Zhudova P.P. **1967**. [The vegetation and flora of the Sudzukhinskii State Nature Reserve in Primorsky Kray]. *Trudy Sikhote-Alinskogo gosudarstvennogo zapovednika* [*Transactions of the Sikhote-Alin Reserve*], 4: 1–306. (In Russ.).
УДК 551.466.6 (571.645)

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.250-258

Особенности режима волнения в бухтах и на побережье острова Шикотан Малой Курильской гряды

© 2020 П. Д. Ковалев, Д. П. Ковалев*, А. А. Шишкин

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск *E-mail: d.kovalev@imgg.ru

Резюме. Представлены результаты изучения волнения в бухтах Церковная, Димитрова и на восточном побережье о. Шикотан (Малая Курильская гряда) по данным натурных наблюдений за волнением в течение 2015–2018 гг. Целью исследований был анализ опасного волнения в широком диапазоне периодов, его проявлений в бухтах и прибрежной зоне острова. Показано, что в бухтах хорошо выражены сейшевые колебания, которые могут усиливаться при приходе штормов. Наибольшую опасность представляют сейши в диапазоне периодов существования тягуна с периодами около 3 мин в бухте Димитрова и 3.8 мин в бухте Церковная. Расчет добротностей исследуемых бухт показал, что для приходящих на вход бухт волн с периодами близкими к резонансным возможно резонансное усиление амплитуды до 6.5 раз. Поэтому можно ожидать проявления в бухтах тягуна, который представляет опасность для маломерных судов, находящихся в бухтах во время шторма. Показано распространение краевых волн во внешней, береговой зоне, которые проникают в обе бухты, а также возбуждение шельфовой сейши с периодом около 15 мин.

Ключевые слова: ветровое волнение, зыбь, тягун, сейши, краевые волны, о. Шикотан.

Для цитирования: Ковалев П.Д., Ковалев Д.П., Шишкин А.А. Особенности режима волнения в бухтах и на побережье острова Шикотан Малой Курильской гряды. Геосистемы переходных зон, 2020, т. 4, № 2, с. 250–258. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.250-258

Study of waves in the bays and on the coast of Shikotan Island in the Lesser Kuril ridge

Peter D. Kovalev, Dmitry P. Kovalev*, Alexander A. Shishkin

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

Abstract. The results of a study of waves occurring in the bays of Tserkovnaya, Dimitrov and on the east coast of Shikotan Island (the Lesser Kuril ridge) according to field observations during 2015–2018 are presented. The purpose of the research was to analyse dangerous waves occurring over a wide range of time periods and their manifestations in the bays and coastal zone of the island. It is shown that the bays have well-defined seiche fluctuations, which increase as a consequence of storms. A significant hazard is represented by seiches characterised by harbour oscillation having periods of about 3 minutes in the Bay of Dimitrov and 3.8 minutes in the Bay of Tserkovnaya. The calculation of the Q-factor of the studied bays showed that for waves with periods close to harbour resonance occurring at the entrance of bays, an amplification of the amplitude up to 6.5 times is possible, posing a danger to small vessels moored in the bays during times of storm. It is shown that the propagation of edge waves in the outer coastal zone, which penetrate into both bays, as well as the excitation of the shelf seiche, has a period of about 15 minutes.

Keywords: wind waves, swell, harbor oscillations, seiches, edge waves, Shikotan Island.

For citation: Kovalev P.D., Kovalev D.P., Shishkin A.A. Study of waves in the bays and on the coast of Shikotan Island in the Lesser Kuril ridge. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 250–258 (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.250-258

Финансирование

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Введение

Морские бухты используются в различных целях: для устройства портов, пляжей, другой инфраструктуры. Поэтому изучение динамических процессов в бухтах имеет большую практическую ценность. Одно из распространенных явлений в ограниченных бассейнах – сейши, они наблюдаются как в водоемах в целом, так и в отдельных бухтах [Манилюк, Черкесов, 2017; Долгих и др., 2016; Шевченко и др., 2010].

Сейши играют важную роль в динамике заливов или бухт и оказывают значительное влияние на условия работы расположенных на их побережье портов и других промышленных объектов. Для побережья Курильских островов и в несколько меньшей степени для Сахалина эти собственные колебания ассоциируются прежде всего с проблемой цунами – для большинства бухт их резонансные периоды близки к характерным периодам проявления волн цунами (от нескольких минут до нескольких часов).

Остров Шикотан располагается в северо-западной части Тихого океана и входит в состав островов Малой Курильской гряды. Восточное побережье острова обращено к океану и Курило-Камчатскому желобу с резким нарастанием глубины. Так, на расстоянии около 5 км от берега глубина достигает 80–100 м. Поэтому проблема укрытия малых рыбопромысловых судов, работающих вблизи острова, с возможностью якорной стоянки во время штормов при ветрах западных направлений является актуальной.



Рис. 1. Расположение о. Шикотан и исследуемых бухт. Показаны места установки регистраторов волнения. **Figure 1.** Maps of Shikotan Island and Dimitrov and Tserkovnaya bays with the devices location.

Бухты Димитрова и Церковная, расположенные на восточном побережье о. Шикотан (рис. 1), хорошо защищены от южных, западных и северо-западных ветров и могут служить якорной стоянкой для малых судов. Бухта Церковная более закрытая, и здесь относительно спокойно даже при штормах с восточной стороны острова. Зимой бухты не замерзают, но при южных и восточных ветрах забиваются дрейфующим льдом, который в них долго не задерживается.

В то же время приходящая из океана на вход бухты зыбь или волна цунами может вызвать усиление собственных колебаний в бухтах и даже появление тягуна, что может оказаться опасным для судов, находящихся в бухтах. Поэтому необходимо изучение собственных колебаний бухт.

С этой целью, а также для регистрации возможных волн цунами в бухтах Димитрова и Церковная на протяжении многих лет Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН устанавливаются регистраторы волнения. С 2009 г. институт начал использовать новые регистраторы волнения с секундной дискретностью и автономностью до 1 года, позволяющие более детально и качественно проводить изучение волнения в прибрежной зоне. Интерес к сейшам обусловлен необходимостью решения задач не только чисто прикладного характера, но и, в основном, задач фундаментальных, связанных с энергообменом геосфер, механизмом возбуждения сейш, их линейным и нелинейным поведением.

Целью настоящего исследования был анализ опасного волнения в широком диапазоне периодов, его проявлений в бухтах и прибрежной зоне острова. Ранее работы других исследователей в этом регионе были сфокусированы в основном на проблеме цунами, где модовая структура собственных колебаний в бухтах рассматривалась лишь как важная характеристика проявлений цунами [Шевченко и др., 2017; Шевченко и др., 2018], тогда как настоящее исследование посвящено анализу модовой структуры в качестве интересной и самостоятельной задачи, как, например, в [Манилюк и др., 2019].

Материалы и методы

В настоящей работе для бухты Димитрова анализируются временные ряды колебаний уровня моря (волнения) с дискретностью 1 с длительностью 5 мес. в 2015 г. и 14 мес. в 2017–2018 гг. За это время наблюдались два сильных шторма: 8 октября 2015 г. с высотой волн до 2.2 м и 23 января 2018 г. с высотой волн до 2 м. В остальных штормовых случаях высота волн была около 1 м. Следует отметить, что с середины февраля до середины сентября море в бухте Димитрова обычно относительно спокойно, с высотой волн до 30 см.

Для бухты Церковная использовался временной ряд с октября 2017 по сентябрь 2018 г. продолжительностью 12 мес. Высота волн здесь существенно ниже, чем в бухте Димитрова, во время шторма 23 января 2018 г. высота волн достигала только 30 см. Это объясняется большей закрытостью бухты. Следует также отметить, что с октября 2017 по январь 2018 г. записи проводились синхронно в обеих бухтах, и это позволяет провести взаимно-спектральный анализ волнения, которое может возбуждаться приходящими на вход бухт волнами, и установить связь между проявлениями волнения в обеих бухтах.

Результаты и обсуждение

С использованием специальной, разработанной в лаборатории волновой динамики и прибрежных течений ИМГиГ ДВО РАН программы Кута [Ковалев, 2018] была проведена визуализация и выполнен спектральный и взаимно-спектральный анализ полученных временных рядов. Следует отметить, что с целью более детального анализа изучение волнения проводилось в диапазонах периодов волн от 2 с до 200 мин с необходимой детализацией для исследуемых типов волнения.

В диапазоне ветровых волн и зыби в бухтах Димитрова и Церковная с приходом шторма вначале наблюдается появление коротких ветровых волн с периодами от 2.5 с (рис. 2). Их период медленно растет и примерно через 12 ч волнение переходит в зыбь, периоды которой также растут в течение 12 ч, пока не достигнут максимума 15–18 с в бухте Димитрова и примерно 15 с в бухте Церковная. При этом поведение волнения в бухтах, как показывают данные наблюдений, не зависит от времени года.

С появлением зыби с периодами около 12 с в результате нелинейного взаимодействия этих волн начинается генерация инфрагравитационных волн [Munk, 1949; Tucker,



Рис. 2. Спектры волнения в бухтах для диапазона периодов 2–100 с. **Figure 2.** Wave spectra in the bays for the period range 2–100 s.

1950] без ярко выраженной модовой структуры в диапазоне периодов от 18 с до почти 10 мин. Эти инфрагравитационные волны способствуют генерации в бухтах сейш, в том числе и ответственных за явление тягуна. Следует отметить, что во время наших исследований волнения в прибрежной зоне о. Сахалин вначале регистрировалась зыбь, приходящая от удаленного шторма, и только с приходом шторма начиналось ветровое волнение [Ковалев и др., 2019].

Такое поведение ветровых волн, опережающих приход зыби, обусловлено прежде всего розой ветров для данного района. Так, диаграмма розы ветров для близкого к району наблюдений пункта на о. Кунашир в Южно-Курильске (по данным https://www.meteoblue. com/) показывает, что основные направления ветров южное и северо-западное. Карты скоростей поверхностного ветра над океаном, приведенные на сайте NASA (https:// worldview.earthdata.nasa.gov/), также подтверждают, что ветра для рассматриваемого события 22-24 января были северо-западного направления. И, по-видимому, о. Шикотан закрывает бухты восточного побережья от раннего прихода в них зыби.

По спектрам для диапазона периодов до 1 мин видно, что записи волнения в обеих бухтах схожи, но ветровое волнение и зыбь в бухте Димитрова имеют большие высоты волн, чем в Церковной, в связи с большей закрытостью последней. Поэтому и энергия инфрагравитационных волн, являющихся результатом взаимодействия волн зыби, в бухте Димитрова больше.

Спектры для диапазона периодов 1–40 мин (рис. 3) свидетельствуют, что в каждой бухте имеется своя система сейш с различными периодами колебаний, энергия которых увеличивается во время шторма. Интересной особенностью является наличие в обеих бухтах колебаний с периодом около 15 мин, когерентность на этих периодах достигает 0.8.

Рассмотрим подробнее волновые процессы в диапазоне периодов 1 – 40 мин, для которого были рассчитаны спектры колебаний уровня моря, приведенные на рис. 4. Видно, что при шторме энергия волнения в диапазоне периодов до 6 мин возрастает на два порядка. При этом основные энергонесущие пики, на которых можно ожидать проявления тягуна, расположены на периодах около 3 мин для бухты Димитрова и 3.8 мин для бухты Церковная.

Известно [Рабинович, 1993], что способность усиливать приходящие на вход бухты волны определяется добротностью бухты.



Рис. 3. Временные ряды наблюдений и взаимно-спектральные характеристики волнения для бухт Димитрова и Церковная для периодов волн от 1 до 40 мин.

Figure 3. Time series of observations and cross-spectral characteristics of waves for Dimitrov and Tserkovnaya bays for wave periods from 1 to 40 minutes.

Расчет добротности *Q* резонансной системы акваторий бухт для указанных выше периодов проводился из спектров, основываясь на том, что добротность определяет относительную величину резонансного максимума в энергетическом спектре колебаний [Зернов, Карпов, 1972]. Если система обладает достаточно высокой добротностью, то она определяется выражением:

$$Q = \omega_0 / \Delta \omega, \tag{1}$$

где ω_0 – резонансная частота системы (резонансного максимума), $\Delta \omega$ – ширина максимума. При этом ширина максимума определяется как полоса частот, в пределах которой энергия колебаний спадает в 2 раза [Зернов, Карпов, 1972].

Максимальное (резонансное) значение амплитуды вынужденных колебаний можно определить из выражения:

$$A_{\rm pe3} = A_{\rm BH} \omega_0^2 / 2\delta \sqrt{(\omega_0^2 - \delta^2)}, \qquad (2)$$

где δ – коэффициент затухания ($\delta = \omega_0/2Q$), ω_0 – резонансная частота системы, $A_{\rm BH}$ – амплитуда приходящей волны [Рабинович, 1993].

Расчет показал, что добротность резонансной системы бухты Димитрова 6.1, а бухты Церковная 6.3, и при этом следует ожидать резонансного усиления приходящих на вход бухт на резонансных периодах волн примерно в 6.5 раза. Таким образом, возмож-



Рис. 4. Спектры колебаний уровня моря в бухтах Димитрова (сплошная линия) и Церковная (пунктирная линия).

Figure 4. Spectra of the sea level fluctuations in Dimitrov (solid line) and Tserkovnaya (dotted line) bays.

но значительное усиление волн и проявление тягуна в обеих бухтах на периодах около 3 мин. Заметим, что на близких к 3 мин периодах тягун проявляется в бухтах портов Холмск и Корсаков [Ковалев и др., 2007; Ковалев, 2012], и этот период определяется, повидимому, особенностями судов и их меньшей устойчивостью к раскачке.

Далее проведем расчет собственных колебаний в изучаемых бухтах и сравним с экспериментальными данными. Применение сложной модели с конформным отображением области бухты на круг или кольцо с помощью рекуррентного численного *RT*-алгоритма [Рабинович, Тюрин, 1983 а, 6] существенно усложняет расчет, но не дает значительного выигрыша в точности определения периодов сейш в связи с изменением глубины и береговой линии на приливно-отливном цикле. Расчет сейш проводился с использованием формулы для открытого с одного конца бассейна по формуле (3), приведенной в работе [Рабинович, 1993]:

$$T_n = \frac{4L}{(2n+1)\sqrt{gH}},\tag{3}$$

где L – длина бассейна, n = 0, 1, 2, ... – номер моды, H – глубина, g – ускорение свободного падения.

Наряду с (3) использовалось выражение из [Манилюк, Черкесов, 2016] для вычисле-

ния периодов сейшевых колебаний жидкости. Расчеты, выполненные в диапазоне периодов от 0.5 до 10 мин, показали, что для хорошо выраженных в спектрах пиков близкие к наблюдаемым значения периодов в обеих бухтах получены с применением уравнения (3). Вычисления подтвердили наличие сейш на периодах около 3 мин для бухты Димитрова и 3.8 мин для бухты Церковная.

Расчеты показали наличие пиков в спектрах волнения для обеих бухт на периодах около 18 мин для Церковной и 17 мин для Димитрова, что согласуется с данными наблюдений и присутствием в спектрах обеих бухт (рис. 4) широкого максимума на указанных периодах, при этом в бухте Димитрова его величина значительно больше доверительного интервала. Текущие спектры также имеют максимумы на периодах 18 и 17 мин. Эти максимумы соответствуют нулевым модам (модам Гельмгольца) для обеих бухт.

Однако ранее отмеченный на диаграмме когерентности (рис. 3) узкий максимум располагается на периоде около 15 мин, который на спектрах колебаний уровня моря визуально не обнаруживается, поскольку его энергия на порядок меньше, чем энергия сейш с нулевой модой, и он как бы сливается с их пиками. Диаграмма текущей фазы подтверждает наличие колебаний в бухтах с этим периодом, обусловленных, по-видимому, волной с периодом 15 мин, приходящей из внешней акватории и, возможно, передающей энергию близким по периодам волнам. То, что это волна из внешней акватории – прибрежной (шельфовой) зоны о. Шикотан, как раз и подтверждает когерентность, показывая высокую степень связи между волнами в бухтах, и эта связь может осуществляться только через внешнюю акваторию.

Рассмотрим возможность существования волны с периодом около 15 мин в краевой области вблизи о. Шикотан. Для этого используем профиль глубины для этого района, который приведен в [Рабинович, 1993]. Там же взяты и выражения для расчета дисперсионной диаграммы для модели выпуклого экспоненциального профиля.

Расчет дисперсионной диаграммы показал, что для модели профиля, аппроксимирующего реальный профиль глубины, возможно существование краевой волны с периодом 15.2 мин и длиной 25.3 км. При расстоянии между бухтами Церковная и Димитрова около 12.4 км эта дистанция будет составлять около ½ длины краевой волны. И это будет соответствовать фазовому спектру (рис. 3) с разностью фаз около 3 рад. В этом случае волна распространяется с севера и сначала проходит к входу в бухту Димитрова, а далее к бухте Церковная.

При анализе колебаний с периодом около 15 мин проверялись все возможные варианты генерации волн с этим периодом в рассматриваемом районе. Поэтому были рассчитаны периоды шельфовых сейш для наклона дна $\alpha = 0.036$ и ширины шельфа L = 225 км по приведенной в [Рабинович, 1993] формуле:

$$T_n = 8\sqrt{L}/(n\sqrt{g\alpha}),\tag{4}$$

где n = 1,3,5..., - номер моды. Вычисления показали, что период седьмой моды шельфовой сейши равен 15.2 мин и близок к обнаруженному максимуму в спектрах на периоде 15 мин. Это подтверждает предположение о том, что проходящая краевая волна возбуждает шельфовые сейши в резонансной акватории восточного побережья о. Шикотан.

Анализ спектров для диапазона периодов 30–200 мин (рис. 5) показал наличие нескольких максимумов волновой энергии в обеих бухтах. Расчеты, сделанные с целью идентификации типов волн, позволили установить,



Рис. 5. Спектры колебаний уровня моря для диапазона периодов 30–200 мин по данным наблюдений в бухтах Димитрова (пунктирная линия) и Церковная (сплошная линия). Когерентность – сплошная линия, фаза – пунктирная.

Figure 5. Spectra of sea level fluctuations for a range of periods of 30–200 minutes according to observations in Dimitrov (dotted line) and Tserkovnaya (solid line) bays. Coherence is a solid line, phase is a dotted line.

что волны с периодом около 35 мин обусловлены третьей модой шельфовой сейши. Волны более длинных периодов, согласно рассчитанной дисперсионной диаграмме, могут быть отнесены к краевым волнам. В то же время, поскольку краевые волны распространяются вдоль побережья, должна существовать разность фаз между двумя точками наблюдения.

Разность фаз между бухтами Димитрова и Церковная уменьшается с увеличением длины периода, поскольку при этом растет и длина волны. Поэтому на расстоянии около 12 км более длинные волны будут иметь меньший набег фазы, и разность фаз будет уменьшаться с увеличением периода. Расчеты показывают, что для краевой волны первой моды с периодом 42 мин длина волны составляет около 440 км. При этом набег фазы на дистанции 12 км равен 0.18 рад. Из графика (рис. 5) можно видеть, что разность фаз несколько больше - около 0.25 рад. Возможно, что это расхождение связано с изрезанностью береговой линии и допущениями при аппроксимации. При дальнейшем увеличении периода краевых волн набег фазы должен уменьшаться, что и наблюдаем на графике фазы рис. 5.

Заключение

Проведен детальный анализ волнения в бухтах Димитрова и Церковная, расположенных на восточном побережье о. Шикотан Малой Курильской гряды, с целью исследования опасных сейшевых колебаний для обеспечения безопасности мореплавания в бухтах и в частности якорной стоянки малых судов.

Анализ волновых процессов в диапазоне периодов 30 с – 40 мин по данным натурных наблюдений показал наличие в бухтах хорошо выраженных систем собственных колебаний. Основные энергонесущие пики в спектрах расположены на периодах около 3 мин для бухты Димитрова и 3.8 мин для бухты Церковная.

Показано, что добротность бухты Димитрова 6.1, а бухты Церковная 6.3. И на периодах около 3 мин следует ожидать резонансного усиления амплитуды до 6.5 раза приходящих на вход бухт волн с периодами близкими к резонансным. Поэтому на данных периодах возможно проявление тягуна, опасного для маломерных судов, находящихся в бухтах во время шторма.

Расчет периодов сейш в бухтах Димитрова и Церковная показал возможность генерации сейш с периодами от 1.6 до 9 мин и соответствие периодов сейш зарегистрированным в спектрах максимумам. Кроме того, в спектрах выделяются максимумы с периодами 18 мин для бухты Церковная и 17 мин для бухты Димитрова, что согласуется с данными расчетов для мод Гельмгольца этих бухт.

На рассчитанной диаграмме текущей когерентности наблюдается устойчивый максимум, достигающий 0.8 на периоде колебаний около 15 мин, который на спектрах колебаний уровня моря не выделяется, поскольку его энергия на порядок меньше, чем сейш с нулевой модой, и он как бы сливается с их пиками. Объяснение этому волновому процессу дано путем расчета, показавшего существование краевой волны с периодом 15.2 мин на восточном побережье о. Шикотан, что подтверждается и рассчитанной диаграммой текущей фазы. Показано, что проходящая краевая волна возбуждает шельфовые сейши в резонансной акватории восточного побережья о. Шикотан.

Спектры колебаний уровня показали наличие волновых процессов в диапазоне периодов 30–200 мин. Установлено, что первый из них, с периодом около 35 мин, вызван третьей модой шельфовой сейши, а другие относятся к краевым волнам.

Список литературы

1. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. **2016.** Собственные колебания уровня воды в бухтах залива Посьета Японского моря. *Метеорология* и гидрология, 8: 57–63.

2. Зернов Н.В., Карпов В.Г. 1972. Теория радиотехнических цепей. Л.: Энергия, 816 с.

3. Данные и информационная система наблюдения Земли. URL: https://worldview.earthdata.nasa. gov (дата обращения: 23.06.2019).

4. Ковалев Д.П. **2012**. Экспериментальные исследования явления тягуна в основных портах Сахалинской области. *Мир транспорта*, 6: 36–43.

5. Ковалев Д.П. **2018.** *Кута: программа для ЭВМ*. RU 2018618773. № 2018612587; заявл. 20.03.2018; опубл. 19.07.2018.

6. Ковалев П.Д., Шевченко Г.В., Ковалев Д.П. **2007.** Экспериментальные исследования явления тягуна в порту г. Холмск. *Известия АИН им. А.М. Прохорова. Прикладная математика и механика.* H-Hoвгород: HГТУ, 20: 106–112.

7. Ковалев П.Д., Ковалев Д.П., Хузеева М.О. **2019.** Оценка параметров волн зыби для прогнозирования штормовых ситуаций. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, 2(372): 114–128.

8. Манилюк Ю.В., Лазоренко Д.И., Фомин В.В. **2019.** Резонансные колебания в системе смежных бухт. *Морской гидрофизический журнал*, 5: 423–436. https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-423-436

9. Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В. **2016.** Исследование свободных колебаний жидкости в ограниченном бассейне, представляющем приближенную модель Азовского моря. *Морской гидрофизический журнал*, 2: 16–26. https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-2-16-26

10. Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В. **2017.** Исследование сейшевых колебаний в бухте со свободным входом. *Морской гидрофизический журнал*, 4: 16–25. https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-4-16-25

11. Рабинович А.Б. **1993.** Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. Л.: Гидрометеоиздат, 325 с.

12. Рабинович Б.И., Тюрин Ю.В. **1983а.** Об одном рекуррентном численном методе конформного отображения. Докл. АН СССР, 272(3): 532–535.

13. Рабинович Б.И., Тюрин Ю.В. **19836.** Рекуррентный численный метод конформного отображения двусвязных областей на круговое кольцо. Докл. АН СССР, 272(4): 795–798.

14. Шевченко Г.В., Лоскутов А.В., Кайстренко В.М. **2018.** Новая карта цунамирайонирования Южных Курильских островов. *Геосистемы переходных зон*, 2(3): 225–238.

http://dx.doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.225-238

15. Шевченко Г.В., Лоскутов А.В., Шишкин А.А., Ивельская Т.Н. **2017.** Особенности появления Чилийских цунами 1 апреля 2014 г. и 16 сентября 2015 г. на Тихоокеанском побережье России. *Океанология*, 57(6): 967–977. https://doi.org/10.7868/S0030157417060119

16. Шевченко Г.В., Чернов А.Г., Ковалев П.Д., Горин И.И. **2010**. Резонансные колебания в заливах и бухтах: натурные эксперименты и численное моделирование. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 1(80): 52–62.

17. Munk W.H. 1949. Surf beats. Transactions of the American Geophysical Union, 30(6): 849–854.

18. Tucker M.J. **1950.** Surf beats; sea waves of 1 to 5 min period. *Proceedings of the Royal Society of London*, A202(1071): 565–573.

Об авторах

КОВАЛЕВ Петр Дмитриевич (ORCID 0000-0002-7509-4107), доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, p.kovalev@imgg.ru, КОВАЛЕВ Дмитрий Петрович (ORCID 0000-0002-5184-2350), доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, d.kovalev@imgg.ru, ШИШКИН Александр Алексеевич, научный сотрудник лаборатории цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.

References

1. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Plotnikov A.A., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. **2016.** Free oscillations of water level in the Posyet Gulf bays (the Sea of Japan). *Russian Meteorology and Hydrology*, 41(8): 559–563. https://doi.org/10.3103/S1068373916080057

2. Earth Observing System Data and Information System. URL: https://worldview.earthdata.nasa.gov (accessed 29.09.2019).

3. Kovalev D.P. **2012.** [Experimental studies of the harbor oscillation phenomenon in the main ports of the Sakhalin region]. *Mir transporta* [*World of Transport*], 6: 36–43. (In Russ.).

4. Kovalev D.P. **2018.** *Kyma:* The software. RU 2018618773. № 2018612587; registration 20.03.2018; publication 19.07.2018.

5. Kovalev P.D., Shevchenko G.V., Kovalev D.P. **2007.** [Experimental studies of the harbor oscillation phenomenon in the port of Kholmsk]. *Izvestiya AIN im. A.M. Prohorova. Prikladnaya matematika i mekhanika* [*News Academy of Engineering Sciences A.M. Prokhorov. Applied mathematics and mechanics*]. Nizhnii Novgorod: NGTU, 20: 106–112. (In Russ.).

6. Kovalev P.D., Kovalev D.P., Khuzeeva M.O. **2019.** Estimation of swell wave parameters for predicting storm situations predicting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Studies and Forecasts*], 2(372): 114–128. (In Russ.).

7. Manilyuk Yu.V., Cherkesov L.V. **2016.** Investigation of free liquid oscillations in a bounded basin representing an approximate model of the Sea of Azov. *Physical Oceanography*, 2: 14–23.

https://doi.org/10.22449/1573-160X-2016-2-14-23

8. Manilyuk Yu.V., Cherkesov L.V. **2017.** Investigation of seiche oscillations in a free entrance bay. *Physical Oceanography*, 4: 16–25. https://doi.org/10.22449/1573-160X-2017-4-16-25

9. Manilyuk Yu.V., Lazorenko D.I., Fomin V.V. **2019.** Resonance oscillations on the system of adjacent bays. *Physical Oceanography*, 5: 374–386. doi:10.22449/1573-160X-2019-5-374-386

10. Munk W.H. 1949. Surf beats. Transactions of the American Geophysical Union, 30(6): 849–854.

11. Rabinovich A.B. **1993.** *Long ocean gravity waves: Trapping, resonance, and leaking.* Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 325 p. (In Russ.).

12. Rabinovich B.I., Tyurin Yu.V. **1983a.** [On a recurrent numerical method for conformal mapping]. *Doklady AN USSR*, 272(3): 532–535. (In Russ.).

13. Rabinovich B.I., Tyurin Yu.V. **1983b.** [A recurrent numerical method for conformal mapping of twoconnected regions to a circular ring]. *Doklady AN USSR*, 272(4): 795–798. (In Russ.).

14. Shevchenko G.V., Chernov A.G., Kovalev P.D., Gorin I.I. **2010.** Resonant vibrations in bays and coves: field experiments and numerical modeling. *Trudy NGTU im. R.E. Alexeeva = Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, 1(80): 52–62. (In Russ.).

15. Shevchenko G.V., Loskutov A.V., Shishkin A.A., Ivel'skaya T.N. **2017.** Features of manifestation of the Chilean Tsunami on April 1, 2014, and September 16, 2015, on Russia's Pacific Coast. *Oceanology*, 57(6): 870–879. https://doi.org/10.1134/S0001437017060145

16. Shevchenko G.V., Loskutov A.V., Kaystrenko V.M. **2018.** A new map of tsunami hazard for the South Kuril Islands. *Geosistemy perekhodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 225–238. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.225-238

17. Tucker M.J. 1950. Surf beats; sea waves of 1 to 5 min period. *Proceedings of the Royal Society of London*, A202(1071): 565–573.

18. Zernov N.V., Karpov V.G. **1972.** *Teoriya radiotekhnicheskih cepej* [*Theory of radio-engineering circuits*]. Leningrad: Energia [Energy Publ.], 816 p. (In Russ.).

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 550.344.42+551.466.62

https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.259-265

Моделирование процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами 25.03.2020

© 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. Целью работы является демонстрация возможности использования данных действующей станции DART 21416 и виртуальной станции DART 21402 для оперативного прогноза Онекотанского цунами 25.03.2020 в населенных пунктах Курильских островов. Ретроспективная оценка выполнена способом (экспресс-методом) оперативного прогноза цунами. Заблаговременность прогноза по данным виртуальной станции DART 21402 выше, чем по данным станции DART 21416, она составляет 41 мин для Северо-Курильска и более 60 мин для других населенных пунктов Курильских островов. Расчетные амплитуды цунами составили 30 см вблизи уреза воды в Северо-Курильске, в других населенных пунктах Курильских островов – до 4 см. При реализации экспресс-метод может быть более эффективным средством оперативного прогноза цунами, чем способ Японского метеорологического агентства, согласно которому на Курильских островах ожидались волны с амплитудами 1–3 м при фактических до 0.5 м.

Ключевые слова: цунами, магнитуда землетрясения, тревога цунами, Онекотан, Курильские острова, Северо-Курильск, оперативный прогноз цунами, заблаговременность прогноза, DART.

Для цитирования: Королев Ю.П., Королев П.Ю. Моделирование процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами 25.03.2020. Геосистемы переходных зон, 2020, т. 4, № 2, с. 259–265. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.259-265.

Simulation of the process of short-term forecasting of the 25.03.2020 Onekotan tsunami

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. This work aims to demonstrate the potential application of the data from the DART 21416 operation station and the DART 21402 virtual station for the short-term forecast of the 2020 Onekotan tsunami in the localities of the Kuril Islands. The retrospective assessment has been made using the method (expressmethod) of a short-term tsunami forecast. The forecast lead time according to the virtual DART 21402 station is higher in comparison with the data of DART 21416 station. It is 41 min for Severo-Kurilsk and more than 60 min for other settlements of the Kuril Islands. The estimated amplitudes of the tsunami were 30 cm nearby the water's edge in Severo-Kurilsk, and up to 4 cm in other settlements of the Kuril Islands. When implemented, the express-method may be a more effective means of real-time tsunami forecasting than the method of the Japanese Meteorological Agency, according to which the waves with amplitudes of 1–3 m have been expected at the Kuril Islands, while the actual amplitudes have reached just 0.5 m.

Keywords: tsunami, earthquake magnitude, tsunami alarm, Onekotan, Kuril Islands, Severo-Kurilsk, real-time tsunami forecast, forecast lead time, DART.

For citation: Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. Simulation of the process of short-term forecasting of the 25.03.2020 Onekotan tsunami. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 259–265. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.259-265.

Благодарности и финансирование

Авторы выражают благодарность 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

Землетрясение магнитудой 7.3 с эпицентром в 220 км восточнее о. Онекотан (рис. 1) произошло 25 марта 2020 г. в 13:49 сахалинского времени (ниже указывается сахалинское время, разница составляет +11 ч с UTC и +8 ч с московским временем) [*Об угрозе цунами*...]. Впоследствии магнитуда была уточнена до 7.5 [*National Centers*...]. Землетрясение вызвало слабое цунами. Это цунами можно называть Онекотанским по названию ближайшего к очагу острова (по аналогии с наименованиями Симуширские цунами 2006, 2007 и 2009 гг.).

Информационно-обрабатывающим центром «Южно-Сахалинск» Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН была объявлена тревога цунами в 14:00 по Северо-Курильскому району [*Об угрозе цунами*...]. Служба предупреждения о цунами действовала в соответствии с регламентом, объявив тревогу на основании магнитудного критерия. Тихоокеанский центр предупреждения о цунами в 13:57 выпустил бюллетень с предупреждением об опасных волнах цунами для побережья в пределах 1000 км от эпицентра землетрясения. Японское метеорологическое агентство (ЯМА) в 14:16 также предупредило о возможных разрушительных волнах цунами на Курильских островах с амплитудой 1–3 м [Об угрозе цунами...].

Приход цунами в Северо-Курильск ожидался в 15:04 местного времени. Эвакуация населения в безопасную зону завершена к 14:30. Эвакуировано около 400 чел.

Согласно визуальным наблюдениям, 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.

Небольшое цунами было зарегистрировано постом измерений уровня моря «Водопадная» (Камчатка, Россия), мареографами на островах Уэйк и Мидуэй (США). Следы



Рис. 1. Схема расчетной области. Звездочка – эпицентр землетрясения 25.03.2020, ромбы с заливкой – действующие, ромбы без заливки – недействующие станции системы DART, треугольник – пост измерений уровня моря «Водопадная». С-К – Северо-Курильск, К – Курильск, Б – Буревестник, Ю-К – Южно-Курильск, С – Стародубское.

Figure 1. The scheme of the computation area. The asterisk marks the epicenter of the 25.03.2020 earthquake, filled diamonds – active, non-filled diamonds – inactive DART stations, triangle – the "Vodopadnaya" sea level measuring station. The diagram shows: C-K – Severo-Kurilsk, K – Kurilsk, B – Burevestnik, Ю-K – Yuzhno-Kurilsk, C – Starodubskoe.

цунами зарегистрированы в Стародубском (Сахалин, Россия) [Об угрозе цунами...].

Тревожный режим сохранялся до 17:57.

Информация о событиях 25.03.2020 опубликована в СМИ (например, https://sakhalin.info/ news/186919/).

Отсутствие инструментальных измерений уровня моря в Северо-Курильске, как и на всех Курильских островах, не позволяет ни подтвердить высоту цунами 50 см, ни получать достоверную информацию о цунами вообще. Посты измерения уровня моря вблизи берега установлены и работают в Камчатском, Хабаровском и Приморском краях, но отсутствуют на Курилах [Российская служба...], притом что побережье Курильских островов наиболее подвержено цунами.

Как известно, достоверную информацию о цунами в океане дают глубоководные станции системы DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis – оценка и передача данных о цунами в океане) [NOAA Center...], в большом количестве установленные в Тихом океане. До недавнего времени Россия располагала двумя такими станциями (DART 21401 и 21402) в районе глубоководного Курило-Камчатского желоба. В настоящее время станции не функционируют.

Онекотанское цунами 2020 г. зарегистрировано станциями DART 21415, 21416 и 21419 [*National Data...*]. Ближайшей к очагу является станция DART 21416 (положение станции отмечено на рис. 1), пробег цунами до которой по вступлению первого гребня составил 30 мин. Положение ранее существовавшей российской станции DART 21402 (см. рис. 1) ближе всего к очагу цунами. Оперативный прогноз цунами по данным этой станции мог быть получен раньше, чем по данным станции DART 21416.

Целью работы является демонстрация возможности использования данных действующей станции DART 21416 и виртуальной станции DART 21402 для оперативного прогноза Онекотанского цунами 2020 г. в населенных пунктах Курильских островов (ретроспективное моделирование процесса оперативного прогнозирования цунами).

Постановка задачи

Требуется рассчитать форму цунами вблизи населенных пунктов Курильских островов по данным о цунами станций системы DART в предположении, что информация станций поступает в режиме реального времени. Для расчета формы ожидаемого цунами применен способ оперативного прогноза цунами, описанный в [Korolev, 2012 и др.].

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. Для области Курильских островов (рис. 1) ее построение может занимать до 15 мин. Данных о магнитуде землетрясения не требуется.

Моделирование процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами выполнено по данным действующей станции DART 21416 и виртуальной станции DART 21402.

Оценивалась заблаговременность прогноза, т.е. время между расчетным временем прихода цунами (первого гребня волны) в заданную точку и временем выполнения прогноза.

Следует напомнить, что способ создавался с целью оперативного прогноза цунами. Исходной информацией служат только координаты эпицентра землетрясения. Способ является приближенным. Точного совпадения расчетных и реальных форм цунами не ожидалось. Алгоритм оценки формы цунами в настоящей работе является реализацией лишь основной идеи способа, заключающейся в расчете цунами в одной точке вблизи заданного населенного пункта. Расчет детального распределения амплитуд вдоль побережья вблизи уреза воды в оповещаемых населенных пунктах будет возможен при создании единого программного комплекса оперативного прогноза цунами. При этом, разумеется, должна учитываться фаза прилива. Критерием успешности расчета (прогноза) является заблаговременная адекватная оценка опасности цунами, на основании которой службы предупреждения принимают решение об объявлении тревоги цунами в каждом конкретном населенном пункте.

Результаты

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



Рис. 2. Исходные данные для расчетов (DART 21416, 21402). Сравнение результатов расчетов (красная линия) с фактическими данными (черная линия). **Figure 2.** Initial data for computations (DART 21416, 21402). Comparison of computations results (red line) with actual data (black line).

разностной сетки с шагом 1 км на широте 45°.

Построение передаточной функции с учетом времени на определение координат эпицентра землетрясения (10–15 мин) может быть завершено через 25–30 мин после начала землетрясения.

Реконструкция волновой формы цунами на виртуальной станции DART 21402 выполнена экспресс-методом. Использовались данные станции DART 21416, из которых удален предшествующий шум сейсмического происхождения (рис. 2). Восстановленная форма цунами на станции DART 21402 приведена на рис. 2.

Далее выполнялся расчет ожидаемого цунами вблизи населенных пунктов Курильских островов по данным станций DART 21416 и 21402.

Расчет волновых форм цунами (по готовой передаточной функции) в заданных пунктах может быть произведен сразу после получения данных станций о прохождении первого периода цунами. Для станции DART 21416 этот момент времени соответствует 36-й минуте после начала землетрясения, для станции DART 21402 – 28-й минуте.

Результаты расчета волновых форм цунами на станциях DART 21419 и 21415 и вблизи поста измерений уровня моря «Водопадная» (рис. 1) по данным станции DART 21402 приведены на рис. 2. Положение станции DART 21415 выходит за пределы расчетной области, расчет для нее выполнен с использованием другой батиметрии на разностной сетке с шагом 3.8 км.

Получено неплохое соответствие расчетных и зарегистрированных волн на станциях DART 21419 и 21415. Колебания, предшествующие цунами на записях этих станций, являются эффектом волн Рэлея на океанском дне.

Неплохое соответствие получено между расчетной формой волны вблизи поста изме-



Рис. 3. Результаты ретроспективного моделирования процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами 2020 г. Вертикальная черта – момент выработки прогноза.

Figure 3. Results of a retrospective simulation of the process of operational forecasting of the 2020 Onekotan tsunami. The vertical line is the moment of the forecast making.

рений уровня моря «Водопадная» и записью, полученной этим постом. При необходимости расчетная форма волны вполне пригодна для оценки опасности цунами вблизи этого пункта.

Расчет ожидаемого цунами вблизи населенных пунктов Курильских островов выполнен по реконструированному ряду данных станции DART 21402 (рис. 2) длительностью 28 мин от начала землетрясения. Результаты расчета представлены на рис. 3. Вертикальной чертой обозначен момент времени выполнения прогноза. Здесь же представлена форма ожидаемого цунами вблизи Стародубского (Сахалин). Результаты расчета по данным станции DART 21416 совпадают с результатами по данным станции DART 21402.

В Северо-Курильске расчетный приход первой волны с амплитудой около 15 см ожидался через 69 мин (в 14:58) после начала землетрясения. Визуальная оценка высоты волны 50 см сделана вблизи уреза воды при глубине около 1 м. Расчетная амплитуда 15 см получена в ближайшем к берегу узле разностной сетки, 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, дает величину амплитуды около 30 см.

Расчет для Стародубского, выполненный в ближайшей к берегу точке, где глубина воды 23 м, дает амплитуду около 4 мм. В соответствии с законом Грина вблизи уреза при глубине 1 м амплитуда должна быть равной 9 мм.

Заблаговременность прогноза по данным станции DART 21402, составляющая для Северо-Курильска 41 мин, для Курильска 65 мин, для Буревестника (бухта Касатка) 72 мин и для Южно-Курильска 114 мин, вполне достаточна для принятия решения об объявлении тревоги в этих пунктах. Но ввиду малых амплитуд ожидаемых волн в этих населенных пунктах тревога могла не объявляться.

Заблаговременность прогноза по данным станции DART 21416, для Северо-Курильска равная 33 мин, недостаточна для своевременного объявления тревоги цунами в этом пункте. Однако ввиду малой амплитуды волн тревога, если она была объявлена по магнитудному критерию, могла быть отменена после получения данных о расчетной амплитуде.

К сожалению, из-за отсутствия инструментальных наблюдений в населенных пунктах Курильских островов подтвердить или опровергнуть представленные результаты расчетов не представляется возможным.

Обсуждение

Результаты моделирования процесса оперативного прогноза Онекотанского цунами позволяют по-новому взглянуть на события 25.03.2020.

Действия службы предупреждения о цунами являются, по-видимому, оправданными в рамках действующего регламента в условиях отсутствия информации об ожидаемой высоте цунами в Северо-Курильске, отсутствия каких-либо инструментальных наблюдений. Тем более что Тихоокеанский центр предупреждения о цунами и Японское метеорологическое агентство выпустили предупреждения об опасных волнах цунами.

Предупреждение о цунами 25.03.2020 в районе Курильских островов выпущено ЯМА в соответствии с новым регламентом оценки опасности цунами [Users Guide..., 2014]. Регламент основан на предварительных расчетах с использованием упрощенной модели источника. Приближенно оцениваются максимальные амплитуды волн на некотором расстоянии от побережья и, в соответствии с известным законом Грина, вблизи берега на глубинах 1 м. При этом принятие решения об объявлении тревоги цунами возлагается на региональные центры. За прогноз цунами для района Курильских островов отвечает ЯМА. Согласно прогнозу ЯМА, предполагаемые амплитуды цунами едва ли не на порядок превысили амплитуды рассчитанных в настоящей работе и фактически проявившихся волн на побережье Курильских островов.

Надо отдать должное службе предупреждения, что тревога цунами объявлялась только в одном районе – Северо-Курильском. Визуально определенная высота цунами 0.5 м к югу от порта Северо-Курильск в зоне, свободной от застройки, не может быть критерием оправданности тревоги цунами. Данные о высотах цунами в промышленной зоне (район порта) Северо-Курильска отсутствуют.

Несмотря на оправданность действий службы предупреждения, объявленная тревога цунами оказалась фактически ложной ввиду слабого проявления цунами даже в Северо-Курильске. Длительность тревожного режима составила около 4 ч.

Расчет (ретроспективный прогноз) цунами по фактическим данным станции DART 21416 и реконструированным данным виртуальной станции DART 21402 вблизи Северо-Курильска на глубине 17 м дал амплитуду первой волны 15 см, что вполне позволяет оценить ожидаемое цунами как неопасное. Оценка амплитуды вблизи уреза в 30 см не противоречит визуальным наблюдениям. Вблизи других населенных пунктов Курильских островов на глубинах 8–30 м расчетные амплитуды не превышали 2–4 см.

Тревога цунами 25.03.2020 была объявлена в 14:00, за 1 час до ожидаемого времени прихода волны, прогноз выработан в 14:17. Заблаговременность прогноза по данным виртуальной станции DART 21402 на 8 мин выше, чем по данным станции DART 21416, и составляет для Северо-Курильска 41 мин, для Курильска 65 мин, для Буревестника 72 мин и для Южно-Курильска 114 мин. С учетом того, что эвакуация населения в Северо-Курильске 25.03.2020 произведена в течение 30 мин после объявления тревоги цунами, заблаговременность прогноза по данным DART 21402 вполне достаточна для принятия решения об объявлении тревоги и проведения эвакуации населения в безопасное место. В рассмотренной модельной ситуации, разумеется при реализации экспресс-метода в виде единого программного комплекса, при наличии станций измерения уровня океана и оперативно получаемой от них информации, тревога цунами могла бы не объявляться ни в одном населенном пункте Курильских островов.

Заключение

Результаты ретроспективного моделирования процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами 2020 г. вблизи населенных пунктов Курильских островов подтвердили, что на основе экспресс-метода возможен прогноз с заблаговременностью, достаточной для своевременного принятия решения об объявлении тревоги и эвакуации населения в безопасные места. Для этого необходимо наличие станций измерения уровня океана, расположенных в надлежащих точках, и прием информации этих станций в режиме реального времени.

Новый регламент оценки опасности цунами, который использовался Японским метеорологическим агентством при выпуске предупреждения о цунами 25.03.2020, оказался неэффективным для Курильских островов в данной ситуации. Как показали фактические данные, по качеству прогноза он существенно уступает экспресс-методу, примененному в настоящей работе.

Существующая в настоящее время сеть станций системы DART вблизи Курильских островов не всегда может гарантировать необходимую заблаговременность прогноза цунами даже при условии оперативной передачи данных. Действовавшие ранее российские станции DART 21401 и 21402 могли бы обеспечивать с достаточной заблаговременностью прогноз цунами на Курильских островах в случаях землетрясений в районах северных, центральных Курильских островов, восточного побережья Японии.

К сожалению, Сахалинская область не располагает не только средствами регистрации уровня океана для оценки степени опасности цунами, но и прибрежными мареографами на Курильских островах для подтверждения данных о произошедших цунами.

Развитие сети наблюдений за уровнем океана и внедрение способа (экспресс-метода) оперативного прогноза в регламент действий службы предупреждения о цунами позволит в перспективе повысить качество прогнозирования и тем самым уменьшить количество ложных тревог цунами на Курильских островах.

Список литературы

1. 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: 8.04.2020).

2. Российская служба предупреждения о цунами. URL: http://rtws.ru/sea-level/ (дата обращения: 8.04.2020).

3. Korolev Yu. **2012**. A new approach to short-term tsunami forecasting. *Tsunami – Analysis of a Hazard – From Physical Interpretation to Human Impact* (Ed. Gloria I. Lopez). Rijeka, Croatia: InTech, 141–180. dx.doi.org/10.5772/2614.

4. National Centers for Environmental Information. URL: https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml (дата обращения: 4.04.2020).

5. National Data Buoy Center. URL: https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml (дата обращения: 25.03.2020).

6. NOAA Center for Tsunami Research. URL: http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart (дата обращения: 25.03.2020).

7. Users Guide for the Pacific Tsunami Warning Center Enhanced Products for the Pacific Tsunami Warning System. **2014**. *IOC Technical Series*, 105 (UNESCO/IOC).

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

References

1. Korolev Yu. **2012**. A new approach to short-term tsunami forecasting. *Tsunami – Analysis of a Hazard – From Physical Interpretation to Human Impact* (Ed. Gloria I. Lopez). Rijeka, Croatia: InTech, 141–180. dx.doi.org/10.5772/2614

2. National Centers for Environmental Information. URL: https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml (accessed 4.04.2020).

3. National Data Buoy Center. URL: https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml (accessed 25.03.2020).

4. NOAA Center for Tsunami Research. URL: http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart (accessed 25.03.2020).

5. Ob ugroze tsunami posle zemletriaseniia u poberezh'ia Severo-Kuril'skogo raiona 25 marta 2020 goda

[On the threat of tsunamis after an earthquake off the coast of the North Kuril region on March 25, 2020]. URL: http://sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami (accessed 8.04.2020).

6. Rossiiskaia sluzhba preduprezhdeniia o tsunami [Russian tsunami warning service]. URL: http://rtws. ru/sea-level/ (accessed 8.04.2020).

7. Users Guide for the Pacific Tsunami Warning Center Enhanced Products for the Pacific Tsunami Warning System. **2014**. *IOC Technical Series*, 105 (UNESCO/IOC).

Книги

http://dx.doi.org/10.30730/978-5-6040621-8-0.2020-1

Афанасьев В. В. Морфолитодинамические процессы и развитие берегов контактной зоны субарктических и умеренных морей Северной Пацифики / ред. д-р геогр. наук, заслуженный профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова Е.И. Игнатов; рецензенты: д-р геогр. наук Э.А. Лихачева, д-р геогр. наук Л.А. Жиндарев, д-р геогр. наук И.О. Леонтьев. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2020. – 234 с.

ISBN 978-5-6040621-8-0.

DOI: 10.30730/978-5-6040621-8-0.2020-1

Автор посвятил эту книгу памяти своего «Друга и Учителя Евгения Ивановича Игнатова, стараниями которого на Дальнем Востоке России сохранилась береговая геоморфология».

В монографии определены и сформулированы основные закономерности развития берегов морей Северной Пацифики, холодной части умеренного пояса и контактирующих с ними морей субарктического пояса. Анализ особенностей морфолитодинамики берегов в холодный период и выявленная пространственная ритмичность процессов размыва позволили обосновать вывод о возможности абразионного тренда развития морфодинамических систем в условиях отсутствия в береговой зоне дефицита наносов. С использованием современных методов получения и анализа геопространственной и геолого-геоморфологической информации выполнен анализ бюджета наносов в литодинамических системах, получены важные результаты в исследовании морфодинамики аккумулятивных образований различного типа, определены скорости разрушения коренных берегов.

Монография рассчитана на специалистов геоморфологов, физикогеографов, экологов, гидротехников, может быть полезна для преподавателей и студентов вузов.

Ключевые слова. Пространственная структура размыва, процессы на скалистых берегах, лагунные проливы, замерзающие пляжи, мегафестоны, защита берегов.

Для контактов: Афанасьев Виктор Викторович, e-mail: vvasand@mail.ru

Afanas 'yev V.V. **Morpholithodynamic processes and coastal development of the contact zone of the subarctic and temperate seas of the North Pacific:** monograph / Ed. [E.I. Ignatov], Dr Sci. in Geography, Professor Emeritus at Lomonosov Moscow State University; peer-reviewers: E.A. Lichacheva, Dr Sci. in Geography, L.A. Jindarev, Dr Sci. in Geography, I.O. Leont'ev, Dr Sci. in Geography. – Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 2020. – 234 p.



ISBN 978-5-6040621-8-0.

DOI: 10.30730/978-5-6040621-8-0.2020-1

The Author dedicates this book to memory of his "Friend and Teacher, Evgenii Ivanovich Ignatov, through whose efforts the coastal geomorphology has been preserved in the Russian Far East".

The monograph defines and formulates the basic laws of development of the coasts of the North Pacific seas, the cold part of the temperate zone and the seas of the subarctic zone contacting with them. Analysis of the coastal morpholithodynamics peculiarities during the cold period and the revealed spatial rhythmicity of the destruction processes made it possible to substantiate the conclusion about the possibility of an erosion trend in the morphodynamic systems development under the conditions of sediment deficiency absence in the coastal zone. Modern methods of obtaining and analyzing of geospatial and geological and geomorphological information allowed to conduct the analysis of the sediment budget in the lithodynamic systems, to obtain important results regarding to the morphodynamics of barrier islands and accretional spits of various types, and also to determine the rates of rocky shores destruction.

The monograph is aimed at the specialists: geomorphologists, physical geographers, ecologists, hydraulic engineers, it can be useful for teachers and students of universities.

Keywords. Spatial structure of the erosion, rocky coast processes, lagoon straits, freezing beach, megacusps, coast protection. *Contact:* Victor V. Afanas'yev, e-mail: vvasand@mail.ru

Подписка на журнал «Геосистемы переходных зон» на 2020 год принимается всеми отделениями «Роспечати» Индекс 80882.

Полнотекстовые варианты статей доступны на сайтах: журнала http://journal.imgg.ru;

научной электронной библиотеки (eLibrary) https://elibrary.ru/title_about.asp?id=64191

