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

ГЕОСИСТЕМЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН

GEOSYSTEMS of Transition Zones

2021 Том 5 № 2

https://doi.org/10.30730/gtrz

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

ГЕОСИСТЕМЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН

Том 5 № 2 2021 Апрель – Июнь

GEOSYSTEMS OF TRANSITION ZONES

Vol. 5 № 2 2021 April – June

Научный журнал

Учредитель и издатель:
ФГБУН Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Издается с 2017 г.
Периодичность издания 4 раза в год

Scientific journal

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

Published since January 2017
Periodicity: Quarterly

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

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

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

25.00.01. Общая и региональная геология *(геолого-минералогические)*
25.00.03. Геотектоника и геодинамика *(геолого-минералогические)*
25.00.04. 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)*

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

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

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

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

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

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

© ИМГиГ ДВО РАН, 2021

Редакционная коллегия

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Переводчик
Качесова Галина Сергеевна

Editorial Board

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

- **Leonid M. Bogomolov,** Doctor of Sciences in Physics and Mathematics Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
- **Vitaly V. Adushkin**, Academician of RAS, Dr. Sci. Phys. and Math., Institute of Geosphere Dynamics of the RAS; Moscow Institute of Physics and Technology
- **Anatoly I. Alexanin**, Dr. Sci. Eng., The Institute of Automation and Control Processes of the FEB RAS, Vladivostok
- **Victor G. Bykov**, Dr. Sci. Phys. and Math., Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics of the FEB RAS, Khabarovsk
- **Peter O. Zavyalov**, Corr. Member of the RAS, Dr. Sci. Geogr., P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the RAS, Moscow
- **Alexander S. Zakupin**, Cand. Sci. Phys. and Math., Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk – *Deputy Editor-in-Chief*
- **Dmitry P. Kovalev**, Dr. Sci. Phys. and Math., Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk
- **Gevorg G. Kocharyan**, Dr. Sci. Phys. and Math., Professor, Institute of Geosphere Dynamics of the RAS, Moscow
- **Andrei A. Kurkin**, Dr. Sci. Phys. and Math., Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod
- **Vladimir A. Levin**, Academician of RAS, Dr. Sci. Phys. and Math., Professor, The Institute of Automation and Control Processes of the FEB RAS, Vladivostok; Lomonosov Moscow State University, Moscow
- **Vladimir A. Luchin**, Dr. Sci. Geogr., V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- **Yuri V. Marapulets**, Dr. Sci. Phys. and Math., Associate Professor, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of the FEB RAS, Kamchatka Region
- **Anatoly I. Obzhirov**, Dr. Sci. Geol.-Miner., Professor, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- **Stanislav A. Ogorodov**, Prof. RAS, Dr. Sci. Geogr., Corr. Member of the RAES, Lomonosov Moscow State University, Moscow
- **Oleg A. Plekhov**, Dr. Sci. Phys. and Math., Professor, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the RAS, Perm'
- **Alexander S. Prytkov**, Cand. Sci. Phys. and Math., Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk – *Assistant Editor*
- **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) ISSN 2713-2161 (Online)

Геосистемы переходных зон
Том 5 № 2 2021 Апрель – Июнь

Geosystems of Transition Zones
Vol. 5 No 2 2021 April – June

https://doi.org/10.30730/gtrz-2021-5-2 http://journal.imgg.ru https://doi.org/10.30730/gtrz-2021-5-2

Содержание

Геофизика. Сейсмология

А.И. Малышев, Л.К. Малышева. Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил 84

А.С. Прытков, Н.Ф. Василенко. Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. $M_w = 7.5$ 113

ДИСКУССИИ

М.В. Родкин. О форшоковом каскаде и удивительных прогнозах, в связи со статьей А.И. Малышева и Л.К. Малышевой «Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил» 128

Л.М. Богомолов, В.Н. Сычев. Физические основы модели саморазвивающихся процессов и вопросы ее применения для прогнозов землетрясений в Дальневосточном регионе 138

Региональная геология. Геотектоника и геодинамика

Ю.В. Костров, В.А. Дегтярев, А.В. Маринин, Э.К. Хмарин, П.А. Каменев. Изучение трещинных коллекторов при проведении геологоразведочных работ в северо-восточной части о. Сахалин 153

Петрология. Вулканология

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

А.В. Дегтерев, М.В. Чибисова. Активизация вулкана Пик Сарычева в 2020–2021 гг. (о. Матуа, Центральные Курильские острова) 167

Океанология

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

Г.В. Шевченко, В.Н. Частиков. О необычном характере распространения модифицированной амурской воды в заливе Анива (Сахалин) в ноябре 2001 г. 172

Геоэкология

С.Ю. Лупаков. Оценка эластичности стока рек восточной части бассейна Амура 179

Content

Geophysics. Seismology

TRANSLATIONS

A.I. Malyshev, L.K. Malysheva. Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region 99

A.S. Prytkov, N.F. Vasilenko. The March 25, 2020 M_w 7.5 Paramushir earthquake 121

DISCUSSIONS

M.V. Rodkin. On the foreshock cascade and extraordinary predictions, in relevance to the article by A.I. Malysheva and L.K. Malysheva "Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region" 133

L.M. Bogomolov, V.N. Sychev. Fundamental for self-developing processes model and problems of its application to earthquakes prediction in the Far East region 145

Regional geology. Geotectonics and geodynamics

Yu.V. Kostrov, V.A. Degtyarev, A.V. Marinin, E.K. Khmarin, P.A. Kamenev. Study of fractured reservoirs during geological exploration in the north-eastern part of the Sakhalin Island 153

Petrology and Volcanology

SHORT REPORT

A.V. Degterev, M.V. Chibisova. Activation of the Sarychev Peak volcano in 2020–2021 (Matua Isl., the Central Kuril Islands) 167

Oceanology

SHORT REPORT

G.V. Shevchenko, V.N. Chastikov. On the unusual distribution of modified Amur River water in the Aniva Bay (Sakhalin) in November 2001 172

Geoecology

S.Yu. Lupakov. Estimation of the runoff elasticity of the rivers in the eastern part of the Amur River basin 179

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

Редактор к.ф.н. **Низяева Галина Филипповна**
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. 12,6.
Тираж 150 экз. Заказ 7957. Свободная цена.
Подписано в печать 25.06.2021.

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

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

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

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 12,6.
Number of copies 150. Order no. 7957.
Date of publishing 25.06.2021.

Subscription index in United catalogue «Press of Russia» – 80882
The Editorial Office can also be contacted by:
E-mail: gtrz-journal@mail.ru

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

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

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

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

УДК 550.343.6 https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.084-098.099-112

Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил

© 2021 *А. И. Малышев*, Л. К. Малышева*

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

**E-mail: malyshev@igg.uran.ru*

Резюме. В работе описан алгоритм и результаты оценки сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил на основе данных Японского регионального каталога (JMA). В качестве математической модели используется нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка; алгоритмы оптимизации и оценки прогнозируемости представлены авторскими разработками. В основу алгоритма прогнозирования заложен поиск зон сейсмической активности, в которых текущие тренды активности соответствуют форшоковым последовательностям, зафиксированным перед уже произошедшими сильными землетрясениями (прецедентами). Время землетрясения рассчитывается экстраполяцией обнаруженных трендов до уровня активности, имевшего место в момент прецедентного землетрясения. На примере прецедентных форшоковых последовательностей Японии показано, что заблаговременность подобного прогноза достигает 10–15 лет, а его реализация обусловлена сохранением и устойчивостью выявленных трендов. Приведена карта потенциально опасных зон для Сахалина и Курильских о-вов и некоторые примеры расчета времени сильных землетрясений по данным каталога JMA на 31 августа 2018 г. Рассмотрены этапность действий при выявлении потенциально опасных трендов сейсмической активности и специфика возможного использования методики в Сахалинской области.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмическая энергия, форшоки, прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности

Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region

Aleksandr I. Malyshev, Lidiia K. Malysheva*

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia

**E-mail: malyshev@igg.uran.ru*

Abstract. The paper describes the algorithm and the results of the seismic hazard estimate in the Sakhalin and Southern Kurils region based on the data of the Japan Regional Catalogue (JMA). A nonlinear differential equation of the second order is used as a mathematical model, and algorithms for optimization and predictability estimation are presented by the author's solutions. The forecasting algorithm is based on the search for seismic activity zones in which the current activity trends correspond to foreshock sequences recorded before strong earthquakes (precedents) that have already occurred. The earthquake time is calculated with extrapolating the detected trends to the level of activity that occurred at the time of the precedent earthquake. By the example of precedent foreshock sequences in Japan, it is shown that the lead time of such a forecast reaches 10–15 years and its implementation is due to the preservation and stability of the identified trends. A map of potentially dangerous zones for Sakhalin and the Kuril Islands and some examples of calculating the time of strong earthquakes according to the JMA catalogue as of August 31, 2018 are presented. Action sequence in identifying the potentially dangerous trends in seismic activity and the specifics of possible use of the technique in the Sakhalin region are considered.

Keywords: earthquake, seismic energy, foreshock, precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard

Для цитирования: Малышев А.И., Малышева Л.К. Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 2, с. 84–112. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.084-098.099-112

Благодарности и финансирование
Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН АААА-А19-119072990020-6.

For citation: Malyshev A.I., Malysheva L.K. Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 84–112. (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.084-098.099-112

Acknowledgment and Funding
The study was carried out within the framework of the state assignment of the IGG UB RAS No. AAAA-A19-119072990020-6.

Введение

Поток сейсмической энергии землетрясений E показывает хорошую прогнозируемость [Малышев, Малышева, 2018; Малышев, 2019 а, б; Малышев, 2020] при использовании в качестве модели уравнения динамики саморазвивающихся природных процессов (уравнения ДСПП, см. ниже). Полученные результаты продемонстрировали хорошие перспективы аппроксимационно-экстраполяционного подхода для прогноза как самих сильных землетрясений, так и последующего афтершокового затухания сейсмической активности. При обобщении полученных результатов было установлено [Малышев, Малышева, 2019], что область значений параметров α и k в уравнении ДСПП, определяющих форшоковую прогнозируемость сильных землетрясений, смещена относительно всей области прогнозируемости в левую нижнюю часть диаграммы α–lg|k| (рис. 1), т.е. туда, где локализуются фигуративные точки наиболее медленно развивающихся и длительных процессов активизации. Это делает возможным дифференциацию трендов активизации потока сейсмической энергии по параметрам α и k, с одной стороны, на условно безопасные (не имеющие прецедентов завершения сильными землетрясениями), а с другой – на потенциально опасные, заслуживающие пристального внимания в связи с наличием прецедентов (нередко неоднократных) завершения этих трендов сильными землетрясениями.

Обработка данных каталога Японского метеорологического агентства (JMA) показала[1], что прогнозируемая активизация потока сейсмической энергии предшествует 123 (из 676) сильным ($M \geq 7$) землетрясениям. Обнаружено 87 536 прецедентов попадания этих землетрясений в полосу допустимых ошибок при ретроспективной экстраполяции форшоковых трендов в «будущее». В частности, самое сильное землетрясение из этого числа – землетрясение

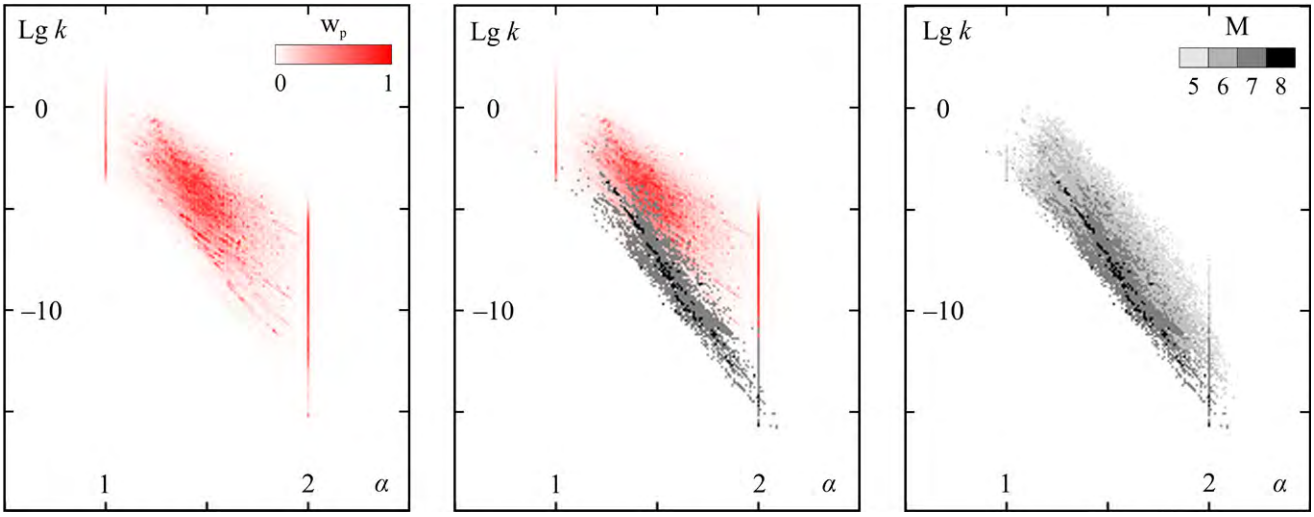


Рис. 1. Распределение удельного веса прогнозируемости w_p для активизации потока сейсмической энергии (слева), форшоковой прогнозируемости сильных землетрясений (справа) и их совмещение (в центре) в координатах α–lg|k| параметров уравнения ДСПП, по [Малышев, Малышева, 2019].

[1] Малышев А.И., Малышева Л.К. Форшоковая прогнозируемость сильных землетрясений Японии по потоку сейсмической энергии (направлена для публикации в журнал «Физика Земли»).

Тохоку (M = 9.0) – имеет 150 прецедентов попадания в полосу ретропрогнозных экстраполяций.

В распределении ретропрогнозных прецедентов по их заблаговременности более 20 % ретропрогнозов имеют заблаговременность от 3 до 10–15 и более лет. Еще почти 45 % ретропрогнозов имеют заблаговременность от 3 мес. до 3 лет. Несмотря на большую полосу ошибок при моделировании потока энергии (по сравнению с «условными деформациями» и числом событий [Малышев, 2019б]), столь высокая заблаговременность обусловливает достаточно высокую точность прогнозирования в этих диапазонах. Причем именно в диапазоне более 3 лет заблаговременность превышает отклонение по времени в момент толчка в среднем в 5.82 раза, а для наиболее точного ретропрогноза этого диапазона – в 37.18 раз. Этот факт свидетельствует о возможности средне-долгосрочной количественной оценки опасности сильных землетрясений.

В данной работе выполнена детализация результатов оценки сейсмической опасности на основе каталога JMA применительно к району Сахалина и Южных Курил, а также обсуждаются перспективы использования сахалинских региональных каталогов в этих целях.

Методы исследования

В работе используется уравнение ДСПП [Малышев, 1991]:

$$x'' = k\,|(x')^{\lambda} - (x'_0)^{\lambda}|^{\alpha/\lambda}, \qquad (1)$$

где x – расчетная характеристика процесса, моделирующая имеющиеся фактические данные, x' и x'' – ее первая и вторая производные по времени t, k – коэффициент пропорциональности, а показатели степени λ и α определяют нелинейность процесса, соответственно, в окрестностях стационарного состояния ($x' \approx x'_0$) и на значительном от него удалении ($x' >> x'_0$).

Для прогноза потенциально катастрофических процессов наиболее интересен случай $x' >> x'_0$. Поэтому в качестве аппроксимационной модели имеет значение уравнение

$$x'' = k\,(x')^{\alpha}. \qquad (2)$$

Линейность решений уравнения (2) в обычных или логарифмических координатах упрощает поиск наилучшего соответствия (оптимизацию) между частным решением уравнения (2) и аппроксимируемыми им фактическими данными [Малышев, 2019а].

Пространственный анализ сейсмических данных осуществляется по сферическим гипоцентральным выборкам с радиусами 1.5, 3, 7.5, 15, 30, 60, 150 и 300 км. Центры выборок фиксированы и распределены по широте, долготе и глубине с шагом смещения, в 1.5 раза меньшим радиуса выборки (т.е. соответственно 1, 2, 5, 10, 20, 40, 100 и 200 км), что обеспечивает пространственное перекрытие выборок и исключает пропуск данных для прогностических оценок. В ретроспективных исследованиях каждое событие анализируемого каталога последовательно рассматривается как «текущее» событие. Момент времени этого события принимается за «настоящее». Время, предшествовавшее данному событию, считается «прошлым», а последующее время – «будущим». Под прогнозируемостью здесь и далее понимается нахождение фактических данных «будущего» в полосе допустимых ошибок относительно расчетной кривой в ее экстраполяционной части. Для оценки прогнозируемости используется среднее отклонение σ фактических точек от расчетной кривой по нормали в координатах, нормированных на диапазон от 0 до 1. Затем аппроксимация экстраполируется в «будущее» до тех пор, пока нормальное расстояние каждой последующей (прогнозируемой) фактической точки до расчетной кривой находится в полосе допустимых ошибок (±3σ) [Малышев, 2016].

Относительная точность прецедентных прогнозов оценивается по формуле $\Delta = (t_{sh} - t_c)/\sigma_t$, где t_{sh} – время главного толчка, t_c – текущее время (момент прогноза), σ_t – среднее отклонение по времени фактических данных от расчетной кривой в ее ближайшей к главному толчку точке. Помимо этого, для прецедентных ретропрогнозных определений и прогнозных экстраполяций имеют значение еще две количественные характеристики – прогнозная нелинейность L_{pn} и аппроксимационно-экстраполяционное соотношение A. Первая характеристика, как будет показано ниже на примере прецедентных ретропрогнозов, отражает стохастичность/детерминированность положения главного толчка относительно его расчетной кривой. Она рассчитывается по формуле

$$L_{pn} = 2\,[\Delta_x - (\Delta_x + \Delta_t)/2]/(\Delta_x + \Delta_t), \qquad (3)$$

где $\Delta_x = (x_{sh} - x_1)/(x_c - x_1) - 1$, $\Delta_t = (t_{sh} - t_1)/(t_c - t_1) - 1$; x_1 и t_1, x_c и t_c, x_{sh} и t_{sh} – соответственно, значения параметра и времени в начальной точке

форшоковой последовательности, в точке прогноза и в момент главного толчка. При этом в случае ретропрогнозов используются фактические значения x_{sh} и t_{sh}, тогда как при прогнозных экстраполяциях – их расчетные величины. Для форшоковых последовательностей величина L_{pn} варьирует от 0 до 1.

В свою очередь аппроксимационно-экстраполяционное соотношение A показывает, во сколько раз полный форшоковый тренд превышает свою аппроксимационную составляющую в координатах полного тренда, нормированных на диапазон от 0 до 1. Статистический анализ этого соотношения выполнен по прецедентным ретропрогнозным определениям и используется для оценки предела прогнозных экстраполяций. В общем случае значение A может быть определено по соотношению длин соответствующих участков расчетной кривой, однако в случае ступенчатых накопительных характеристик сейсмического потока (энергии, условных деформаций или числа событий) более простым и вполне эффективным оказывается расчет по формуле

$$A = 2/[(x_c - x_1)/(x_{sh} - x_1) + (t_c - t_1)/(t_{sh} - t_1)]. \quad (4)$$

Для форшоковой ретропрогнозируемости сильных землетрясений Японии аппроксимационно-экстраполяционное соотношение не превышает значения $A = 2.47$.

Закономерности прецедентной форшоковой подготовки сильных ($M \geq 7$) землетрясений делают возможными выявление аналогичных трендов нарастания сейсмической активности и их последующую экстраполяцию на базе каталога JMA, несмотря на существующую 2-летнюю задержку его пополнения оперативной сейсмической информацией. Прогнозная оценка опасности этих трендов предполагает использование данных прецедентных ретропрогнозов и базируется на возможности привязки времени главного толчка к скорости изменения параметра x'_{sh} в ближайшей к главному толчку точке экстраполяционной кривой. Для этого создается база данных прецедентных ретропрогнозов с включением в нее информации о гипоцентральном радиусе выборки, показателе степени α и коэффициенте k уравнения (2), скорости изменения параметра x'_{sh} в ближайшей к толчку расчетной точке тренда, а также информации о прецедентном главном толчке (магнитуда, локализация в пространстве и во времени).

Суть прецедентно-экстраполяционной оценки сейсмической опасности сводится к выявлению потенциально опасных пространственных зон, в которых наблюдается такое нарастание сейсмической активности, которое имеет исторические прецеденты завершения сильным землетрясением. Количественная сторона прогноза соответствует расчету возможного времени аналогичного землетрясения на основе базы данных его прецедентных прогнозов. Поскольку для каждого типа активизации, определяемого радиусом выборки и значениями показателя степени α и коэффициента k в уравнении (2), подобных прецедентов может быть несколько, соответствующие расчеты возможного времени выполняются для каждого из них.

Алгоритм прогнозных экстраполяций предусматривает следующие операции.

1. Поиск в каталоге незавершенных (не вышедших из полосы допустимых ошибок на момент конца каталога) прогнозных определений, в которых обнаруживается тенденция к нарастанию сейсмической активности.

2. Сопоставление типа нарастания активности с базой данных прецедентных ретропрогнозов по радиусу выборки, показателю степени α (с точностью до 0.01) и коэффициенту k (при сравнении lg k с точностью до 0.1). Все случаи нарастания активности, не имеющие аналогов в базе данных прецедентных ретропрогнозов, игнорируются.

3. Оставшиеся случаи проверяются на прецеденты сильных толчков по ретроспективной базе данных. При этом из рассмотрения исключаются все прецедентные случаи прогноза, для которых скорость изменения параметра на момент прецедентного толчка x'_{sh} меньше текущей (на момент завершения каталога) скорости x' ($x'_{sh} < x'$). Смысл этого ограничения сводится, во-первых, к исключению из рассмотрения постшоковой активности (начальной стадии афтершоковых последовательностей, которая попадает в полосу допустимых ошибок форшоковой активизации), а во-вторых, к акцентированию внимания на ранних стадиях форшоковой подготовки ($x' << x'_{sh}$), где относительная точность прогноза наиболее высока.

4. Для каждого прецедентного ретропрогноза по скорости изменения параметра x'_{sh} рассчитывается время t_{sh} и значение параметра x_{sh}, при которых для данного типа нарастания активности ее уровень будет соответствовать уровню прецедентного толчка:

$$t_{sh} = T_a - x'^{\,1-\alpha}_{sh}/[k(1-\alpha)] \text{ при } \alpha \neq 1$$
$$\text{или } t_{sh} = t_1 + \ln(x'_{sh}/x'_1)/k \text{ при } \alpha = 1, \quad (5)$$

$$x_{sh} = X_a - x'^{\,2-\alpha}_{sh}/[k(2-\alpha)] \text{ при } \alpha \neq 2$$
$$\text{или } x_{sh} = x_1 + \ln(x'_{sh}/x'_1)/k \text{ при } \alpha = 2. \quad (6)$$

Затем рассчитываются уровень прогнозной нелинейности L_{pn}, аппроксимационно-экстраполяционное соотношение A и ожидаемое отклонение по времени σ_t фактических данных от расчетного тренда в момент главного толчка. Значение этого ожидаемого отклонения определяется из среднего отклонения по нормали[2] аппроксимируемых данных и пересчитывается на отклонение по времени в расчетной точке (t_{sh}, x_{sh}) прецедентного толчка. Определения, для которых $A > 2.47$, исключаются из рассмотрения как не имеющие прецедентов.

5. Обнаруженные прецедентные ретропрогнозы группируются по главному толчку. Для каждой группы определяется среднее расчетное время толчка, его среднеквадратическое отклонение σ_{sh}, а также средние значения L_{pn}, A и σ_t.

Исходные данные

В качестве исходных данных в работе используется каталог землетрясений Японского метеорологического агентства (JMA), включающий данные с 1923 г. по конец августа 2018 г.[3] К этому моменту каталог содержал сведения о 3 498 071 землетрясении с магнитудой $M = -1.6 + 9.0$ при ее модальном значении 0.6. В качестве параметра x рассматривается поток сейсмической энергии E, т.е. накопительная сумма энергии землетрясений. При этом энергия одиночного землетрясения оценивается согласно имеющейся зависимости между его магнитудой M и энергетическим классом K [Kanamori, 1977]: $K = 1.5\,M + 4.8$.

Результаты и обсуждение

Примеры ретропрогнозных экстраполяций, имеющих достаточно высокую относительную точность Δ и существенные различия по прогнозной нелинейности L_{pn}, приведены на рис. 2. Табл. 1 содержит данные о главном толчке, выборке и некоторых характеристиках форшокового тренда, соответствующие этим примерам. Первые три графика наглядно иллюстрируют высокую заблаговременность этих форшоковых ретропрогнозов (от 5 до 20 лет), тогда как 4-месячная заблаговременность ретропрогноза 4 соответствует средне-краткосрочному диапазону прогнозирования. Также на рис. 2 можно

Таблица 1. **Данные о главном толчке, выборке и некоторых характеристиках форшокового тренда для примеров ретропрогнозных экстраполяций, приведенных на рис. 1**

		1	2	3	4
Землетрясение					
Дата		1936.11.03	2016.11.22	2010.02.27	2005.08.16
Время		05:45:57	05:59:46	05:31:25	11:46:25
M		7.4	7.4	7.2	7.2
Гипоцентр	широта	38.263°	37.355°	25.919°	38.150°
	долгота	142.062°	141.604°	128.680°	142.278°
	глубина, км	61	24.5	37	42
Выборка					
Радиус, км		300	30	60	30
Центр	широта,	40.588°	37.365°	26.175°	38.084°
	долгота,	141.854°	141.784°	128.743°	142.081°
	глубина, км	0	40	40	40
Форшоковый тренд					
$t_{sh} - t_c$, сут		1749.696	6989.198	5355.244	132.471
$\Delta = (t_{sh} - t_c)/\sigma_t$		16.8551	22.0833	65.0781	658.6533
L_{pn}		0.5645	0.9264	0.9896	0.9999
A		1.9900	2.3711	2.2984	2.0816
α		0.5918	2.0000	1.4827	2.0000
lg k		1.9937	–14.8779	–8.4397	–11.9478

[2] В координатах от первой точки аппроксимационного участка до расчетного толчка, нормированных на диапазон от 0 до 1.
[3] http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo_e.html; данные пополняются с задержкой около 2 лет.

видеть, что для низкой прогнозной нелинейности L_{pn} (график 1 на рис. 2) положение ступени сильного землетрясения в потоке энергии слабо детерминируется полосой допустимых отклонений. Сильное землетрясение в этой полосе могло бы произойти и существенно раньше, и много позже его фактического времени, т.е. стохастичность времени сильного толчка увеличивается с уменьшением прогнозной нелинейности. Последнее характерно для последовательностей активизации, близких к стационарному развитию. Напротив, с ростом прогнозной нелинейности (графики 2–4 на рис. 2) возрастает асимметрия полосы допустимых отклонений по параметру и времени. В результате ступень сильного землетрясения, требующая большого допустимого отклонения по параметру, все более жестко детерминируется сокращением интервала времени, в котором сильный толчок может произойти. Эту изменчивость стохастичности/детерминированности процесса в зависимости от уровня прогнозной нелинейности L_{pn} необходимо учитывать в прогнозных экстраполяционных расчетах времени сильных землетрясений.

В результате анализа данных каталога JMA выявлено 186 зон, для каждой из которых имеется не менее 10 незавершенных (на 31 августа 2018 г.) прогнозных определений с потенциально опасным нарастанием сейсмической активности. Закономерности активизации в этих зонах имеют аналоги в форшоковой подготовке 759 землетрясений-прецедентов. Для оценки сейсмической и цунамиопасности на территории Сахалина и Южных Курил имеют значение зоны с локализацией севернее 40° с. ш. Здесь выявлено 15 потенциально опасных зон, тенденции развития сейсмичности

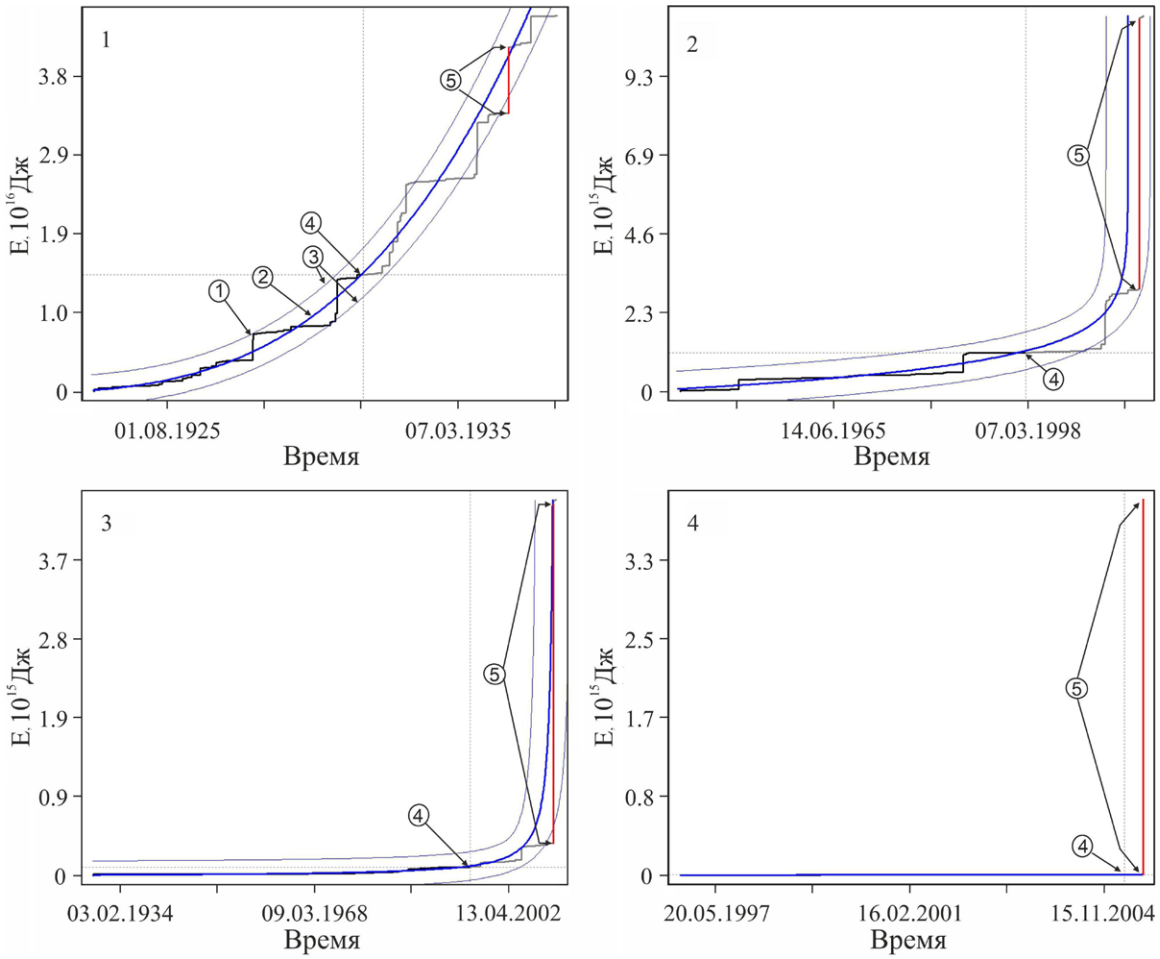


Рис. 2. Примеры некоторых форшоковых экстраполяций потока энергии.
Цифры в кружках: 1 – кривая фактических данных, 2 – расчетная кривая, 3 – полоса ошибок (±3σ), 4 – момент ретропрогноза, 5 – сильное землетрясение. Порядковые номера графиков соответствуют нумерации данных в табл. 1. Пересечение точечных вертикальных и горизонтальных линий на графиках соответствует «текущим» значениям времени и параметра, левее и ниже этого пересечения – «прошлое», правее и выше – «будущее».

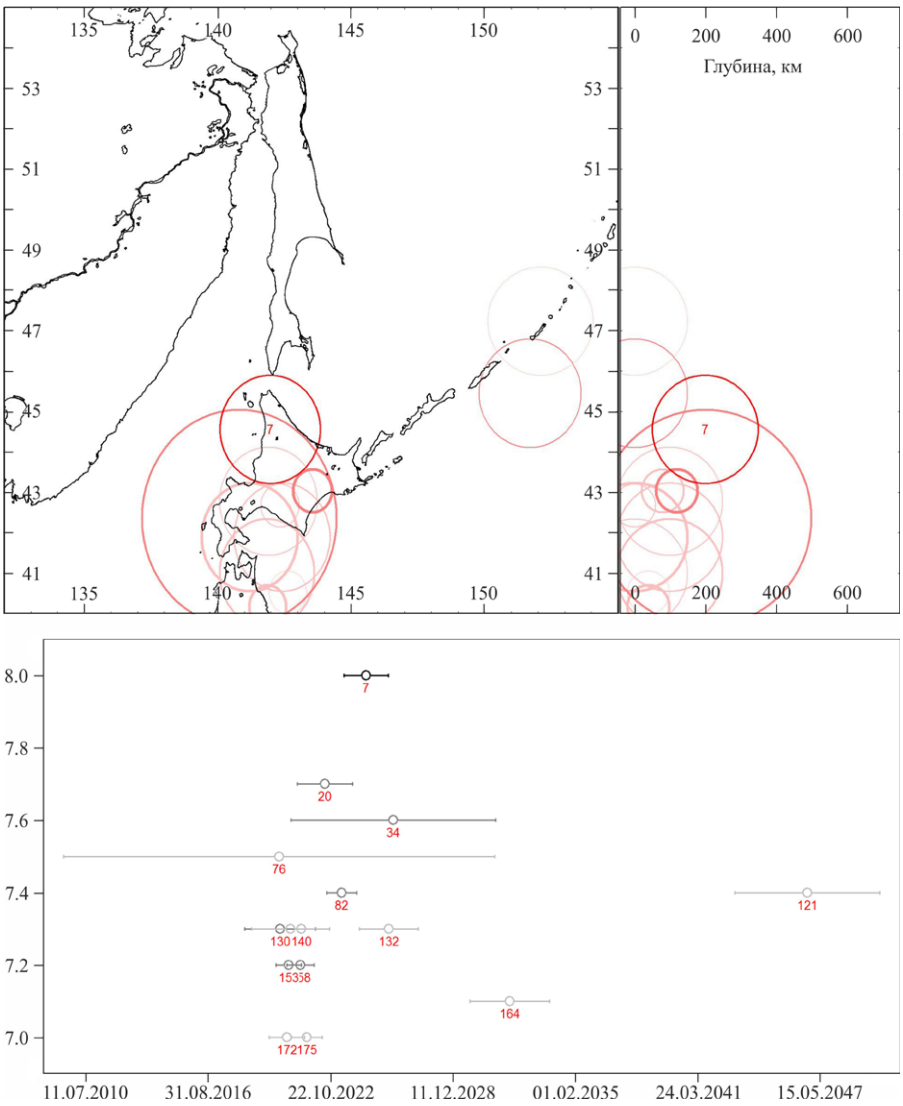


Рис. 3. Карта (вверху слева) потенциально опасных зон нарастания потока сейсмической энергии по состоянию каталога JMA на 31 августа 2018 г., ее меридиональный разрез-проекция (вверху справа) и временная развертка сейсмической опасности.

Окружностями показано положение выборок, в которых обнаружена потенциально опасная активность; яркость линии окружности отражает уровень опасности (по наиболее сильному из возможных при текущих закономерностях активизации землетрясению-прецеденту), а ее толщина – число обнаруженных потенциально опасных незавершенных прогнозных определений; номером 7 обозначена наиболее опасная зона, в которой незавершенные прогнозы имеют тенденции к активизации, аналогичные форшоковой подготовке сильных землетрясений вплоть до землетрясения-прецедента с $M = 8.0$.

Временная развертка сейсмической опасности составлена по самому сильному землетрясению-прецеденту каждой зоны; нумерация зон здесь и в табл. 2 в порядке убывания их опасности (по наиболее сильному прецедентному толчку) по всему каталогу JMA; ошибка расчетного времени прецедентного толчка показана по максимальному из значений $3\sigma_{sh}$ и $3\sigma_t$ (см. табл. 2); прецедентные толчки и их возможная ошибка во времени показана в пяти градациях оттенков от бледно-серого до черного в зависимости от уровня прогнозной нелинейности L_{pn}: (<0.5, 0.5–0.8, 0.8–0.95, 0.95–0.99, 0.99–1.00), что отражает стохастичность/детерминированность взаимосвязи между временем толчка t_{sh} и скоростью изменения параметра x'_{sh}.

которых имеют аналоги в форшоковой подготовке 56 сильных землетрясений-прецедентов (рис. 3, табл. 2). Наибольшую опасность для рассматриваемой территории представляет тренд активности в зоне 7 (рис. 4), имеющей радиус 150 км и располагающейся на севере о. Хоккайдо в непосредственной близости к южной части о. Сахалин и областному центру Южно-Сахалинску. Развитие сейсмической активности в этой зоне имеет аналоги в форшоковой подготовке землетрясения с $M = 8.0$, произошедшего 21 декабря 1946 г. с эпицентром южнее мыса Сиономисаки. Расчетное время аналогичного толчка в зоне 7 соответствует 6 августа 2024 г. с допуском по ошибке времени ($3\sigma_{sh}$) немногим более года. Помимо этого, в зоне 7 возможны и менее сильные землетрясения, так как для некоторых незавершенных прогнозов этой зоны имеются прецеденты в форшоковой подготовке еще 6 сильных землетрясений уровня $M = 7.0–7.5$.

Текущие тренды развития сейсмической активности и их прогнозная экстраполяция для зон 20, 82, 153, 158 иллюстрируют (рис. 5) разнообразие прецедентно-экстраполяционных оценок сейсмической опасности в разных зонах. Естественно, что все 15 потенциально опасных зон заслуживают внимания. Однако полученные по этим зонам результаты следует рассматривать, скорее, как рабочие материалы для экспертных групп по оценке сейсми-

ческой опасности. Здесь прежде всего необходимо учитывать, что все приведенные здесь результаты прецедентно-экстраполяционных оценок являются условными, т.е. имеют смысл при условии, что обнаруженные потенциально опасные тенденции не вышли из полосы допустимых ошибок за период с августа 2018 г. по настоящее время (период текущей задержки данных в каталоге JMA) и сохранят свою актуальность в ближайшем будущем.

Таким образом, метод аппроксимационного анализа и прогнозной экстраполяции на основе уравнения ДСПП на данном этапе можно и нужно использовать как первичный метод пространственной диагностики наличия опасных сейсмических трендов и оценки имеющихся резервов времени. Этот метод анализа и оценки логично встроить в сам процесс создания сейсмических каталогов, документирующих поток сейсмических событий. В этом случае, во-первых, любое пополнение данных каталога и/или их редактирование будут автоматически отражать текущую картину опасных трендов сейсмической активности, их появление или исчезновение (в случае выхода активности за пределы полосы допустимых отклонений тренда), а во-вторых, автоматизация прецедентно-экстраполяционных оценок делает в перспективе возможным использование этих оценок как самостоятельного прогностического метода на краткосрочном уровне заблаговременности.

Определенные основания для этого демонстрирует 4-й пример ретроспективных прогнозных экстраполяций на рис. 2 и в табл. 1. При 4-месячной заблаговременности этот ретропрогноз характеризуется в момент толчка средним отклонением по времени (σ_t) около 0.2 сут. То есть общая полоса допустимых ошибок $\pm 3\sigma_t$ в этом случае составляет всего 1.2 сут. Это, в свою очередь, делает практически возможным применение в опасный период кратковременных превентивных мер, например эвакуации населения на этот период из потенциально опасных зданий и сооружений и объявление повышенной готовности в цунамиопасных районах. Кроме того, подобные средне-краткосрочные прогнозы, как правило, имеют малый радиус пространственной локализации, что также облегчает их практическое использование.

В настоящее время число подобных ретропрогнозов в прецедентной базе невелико, однако существует возможность ее пополнения за счет результатов обработки других каталогов. Сильные землетрясения происходят редко, а качество и детальность регистрации сейсмической активности существенно увеличились в последние годы и десятилетия. В частности, каталог JMA за 80 лет наблюдений в XX в. содержит сведения лишь о 0.5 млн событий, тогда как за первые два десятилетия текущего столетия число зарегистрированных в нем землетрясений превысило 3.5 млн. Естественно ожидать, что детальная регистрация сейсмической подготовки сильных землетрясений в будущем неизбежно приведет к пополнению прецедентной базы более качественными данными. А это, в свою очередь, позволит распространить методику на краткосрочные прогнозные экстраполяции.

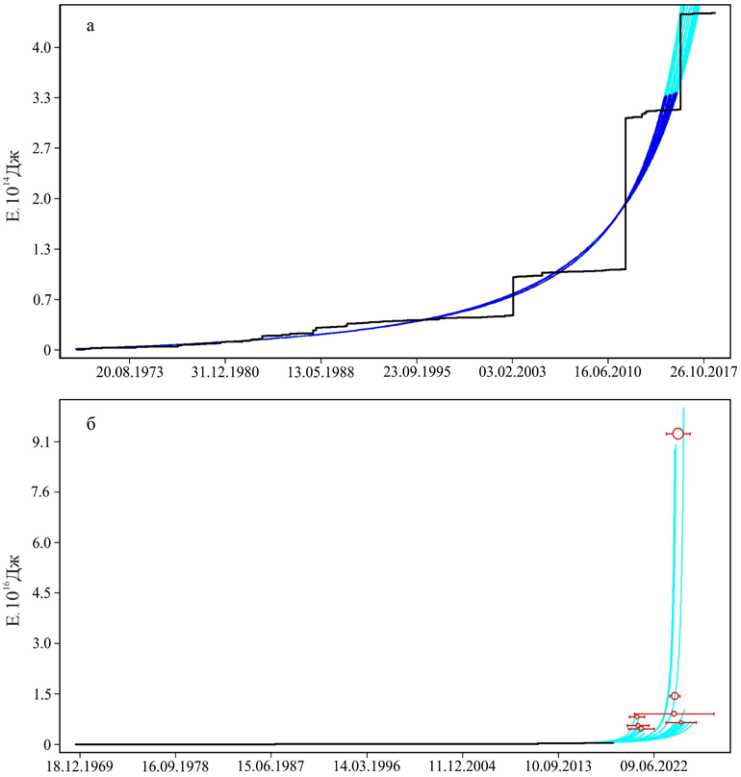


Рис. 4. Текущее (а) и прогнозируемое (б) развитие активности по потоку сейсмической энергии E в зоне 7. Здесь и на рисунках далее расчетные кривые трендов активности показаны более темным оттенком в аппроксимационной части тренда и более светлым – в экстраполяционной. Кружками обозначено расчетное положение прецедентных землетрясений, размер кружков зависит от магнитуды (в данному случае максимальная прецедентная магнитуда $M = 8.0$). Ошибка расчетного времени прецедентного толчка показана по максимальному из значений $3\sigma_{sh}$ и $3\sigma_t$ (см. табл. 2).

Таблица 2. **Локализация зон с потенциально опасной активностью, результаты прогнозных вычислений и прецедентные сильные землетрясения**

№ зоны	Современная потенциально опасная активность							Прогнозные вычисления							Прецедентное землетрясение			
	локализация				начало активизации	n	$L_{pn\ ср.}$	M_{pr}	n_{pr}	расчетная дата	ошибка, сут.		L_{pn}	A	время	гипоцентр		
	центр			R, км														
	Lat	Lon	Dep								$3\sigma_{sh}$	$3\sigma_t$				Lat	Lon	Dep
7	44.554	141.972	200.0	150	1969.07.28	30	0.9799	7.0	1110	2024.11.15	505	362	0.9796	2.2687	2011.04.11 17:16	36.946	140.673	6.4
								7.1	2	2020.12.14	107	359	0.9845	2.1313	1982.03.21 11:32	42.067	142.600	40.0
								7.1	2	2020.10.30	219	253	0.9894	2.1692	2004.11.29 03:32	42.946	145.275	48.2
								7.2	8	2021.03.25	95	438	0.9801	2.1087	2005.08.16 11:46	38.150	142.278	42.0
								7.2	29	2024.04.02	1325	284	0.9849	2.2769	2008.06.14 08:43	39.030	140.881	7.8
								7.5	1	2024.04.26	0	162	0.9913	2.3291	1993.01.15 20:06	42.920	144.353	100.6
								8.0	3	2024.08.06	403	25	0.9986	2.3960	1946.12.21 04:19	32.935	135.849	24.0
20	42.353	140.816	200.0	300	1997.02.10	43	0.6756	7.0	1951	2020.06.24	455	401	0.5905	1.3073	2011.11.08 11:59	27.298	125.739	217.0
								7.2	3225	2021.09.21	476	344	0.7004	1.5396	2010.02.27 05:31	25.919	128.680	37.0
								7.5	129	2022.07.03	504	196	0.8783	1.9613	1964.06.16 13:01	38.370	139.212	34.1
								7.6	43	2022.06.20	502	232	0.8456	1.8721	1984.03.06 11:17	29.343	139.202	452.0
								7.7	215	2022.07.08	504	139	0.9214	2.1037	1998.05.04 08:30	22.379	125.437	35.0
34	43.028	143.557	120.0	60	1931.08.21	81	0.9740	7.0	5	2019.05.02	37	629	0.9701	2.3226	1938.05.23 16:18	36.574	141.324	0.0
								7.0	1	2019.08.06	0	1203	0.9571	2.0814	1971.08.02 16:24	41.301	143.529	54.0
								7.0	3	2020.09.14	93	1115	0.9344	2.2294	2000.01.28 23:21	43.008	146.744	58.5
								7.0	2	2023.03.19	18	1054	0.9344	2.3167	2002.03.31 15:52	24.233	121.970	55.0
								7.0	8	2018.02.03	232	1252	0.9360	2.1092	2008.05.08 01:45	36.228	141.608	50.6
								7.0	123	2022.04.03	3921	980	0.9643	2.1835	2014.07.12 04:22	37.050	142.321	33.0
								7.1	1	2019.09.10	0	705	0.9766	2.1940	2004.11.29 03:32	42.946	145.275	48.2
								7.1	4	2018.10.06	116	1071	0.9640	2.0926	2008.09.11 09:20	41.776	144.152	30.9
								7.3	2	2024.04.21	35	634	0.9779	2.2906	1995.12.04 03:01	44.560	150.130	57.0
								7.3	8	2021.03.01	3891	594	0.9720	2.3581	2001.12.18 13:02	23.893	122.815	8.0
								7.6	122	2025.12.13	1873	317	0.9886	2.3941	2011.03.11 15:15	36.121	141.253	42.7
76	45.446	151.714	0.0	150	1925.02.20	19	0.4602	7.4	16	2024.03.20	260	3717	0.4736	1.3683	1978.06.12 17:14	38.150	142.167	40.0
								7.5	3	2020.03.25	569	3947	0.3886	1.2231	1993.01.15 20:06	42.920	144.353	100.6
82	40.159	141.882	40.0	60	1995.01.07	102	0.9400	7.0	68	2020.04.18	313	771	0.8758	1.7441	2002.03.31 15:52	24.233	121.970	55.0
								7.0	99	2023.05.09	733	339	0.9470	2.3874	2014.07.12 04:22	37.050	142.321	33.0
								7.1	13	2020.12.13	22	591	0.9118	1.9835	1973.06.24 11:43	43.164	146.633	52.0
								7.4	234	2023.05.15	20	272	0.9572	2.4521	2016.11.22 05:59	37.355	141.604	24.5

№ зоны	Современная потенциально опасная активность							Прогнозные вычисления							Прецедентное землетрясение			
	локализация				начало активизации	n	$L_{pn\ ср.}$	M_{pr}	n_{pr}	расчетная дата	ошибка, сут.		L_{pn}	A	время	гипоцентр		
	центр			R, км														
	Lat	Lon	Dep								$3\sigma_{sh}$	$3\sigma_t$				Lat	Lon	Dep
121	47.228	152.103	0.0	150	1931.02.23	12	0.7511	7.4	12	2046.09.20	92	1331	0.7511	2.2419	1978.06.12 17:14	38.150	142.167	40.0
130	43.028	143.557	80.0	60	1933.10.16	48	0.9472	7.0	6	2029.11.13	223	2309	0.8941	1.9930	1978.03.23 12:15	44.800	149.417	60.0
								7.0	6	2029.11.11	223	2341	0.8920	1.9864	1995.12.04 03:04	44.706	150.526	0.0
								7.0	37	2026.11.22	2420	1260	0.9329	2.3562	2002.03.31 15:52	24.233	121.970	55.0
								7.0	3	2023.11.08	35	1389	0.9367	2.1987	2008.05.08 01:45	36.228	141.608	50.6
								7.0	94	2029.01.18	2686	875	0.9601	2.3891	2014.07.12 04:22	37.050	142.321	33.0
								7.3	6	2029.11.19	223	1916	0.9174	2.0705	1978.03.25 04:47	44.333	149.817	40.0
								7.3	3	2020.04.09	46	643	0.9734	2.3371	2001.12.18 13:02	23.893	122.815	8.0
								7.3	6	2029.11.20	223	973	0.9624	2.2575	2011.03.09 11:45	38.328	143.280	8.3
132	40.990	141.854	100.0	150	1995.01.07	33	0.7657	7.3	6039	2025.09.18	409	539	0.7657	2.2305	2011.03.09 11:45	38.328	143.280	8.3
140	42.669	142.337	0.0	60	1952.08.31	14	0.9993	7.0	1739	2021.10.25	458	32	0.9993	2.1371	2011.04.11 17:16	36.946	140.673	6.4
								7.3	4	2021.05.04	50	8	0.9998	2.1477	1994.10.09 16:55	43.558	147.802	0.0
								7.3	5	2023.09.07	145	10	0.9997	2.2083	2011.07.10 09:57	38.032	143.507	34.0
142	40.990	141.854	0.0	150	1995.01.07	13	0.8395	7.0	12	2020.01.24	29	860	0.8109	1.6931	2011.04.11 17:16	36.946	140.673	6.4
								7.3	79	2020.10.13	435	716	0.8438	1.8788	2011.03.09 11:45	38.328	143.280	8.3
153	41.881	141.212	0.0	150	2002.12.05	83	0.9061	7.0	24	2020.07.03	64	234	0.8968	1.9330	2011.04.11 17:16	36.946	140.673	6.4
								7.2	195	2023.02.16	408	170	0.9262	2.4000	1995.01.07 07:37	40.223	142.305	47.8
								7.2	641	2020.09.11	123	231	0.9003	1.9680	2008.06.14 08:43	39.030	140.881	7.8
158	42.772	141.911	100.0	150	1997.02.20	17	0.9328	7.0	16	2021.02.23	113	256	0.9313	2.2952	2011.04.11 17:16	36.946	140.673	6.4
								7.2	542	2021.04.19	175	249	0.9328	2.3125	2008.06.14 08:43	39.030	140.881	7.8
164	40.518	142.628	40.0	60	1995.01.07	12	0.6886	7.0	1	2023.08.01	0	645	0.7577	2.0178	1938.05.23 16:18	36.574	141.324	0.0
								7.0	173	2026.11.16	1792	765	0.6843	2.1397	2002.03.31 15:52	24.233	121.970	55.0
								7.0	4	2024.06.07	933	597	0.7748	2.1323	2014.07.12 04:22	37.050	142.321	33.0
								7.1	8	2031.10.21	120	723	0.7302	2.4500	1982.03.21 11:32	42.067	142.600	40.0
172	41.881	142.424	0.0	150	2009.06.12	30	0.5161	7.0	2233	2020.08.09	129	323	0.5159	1.6681	2005.03.20 10:53	33.739	130.176	9.2
								7.0	6	2021.04.02	276	352	0.5544	1.7229	2013.04.19 12:05	45.301	150.957	125.0
175	41.881	142.424	100.0	150	2003.10.09	23	0.5150	7.0	23	2021.08.08	32	289	0.5150	1.5550	2013.04.19 12:05	45.301	150.957	125.0

Примечание. Lat, Lon – соответственно широта и долгота (°); Dep – глубина, км; R – радиус зоны; n – число незавершенных прогнозных определений; $L_{pn\ ср.}$ – средний уровень прогнозной нелинейности по зоне в целом; M_{pr} – магнитуда прецедентного сильного землетрясения; n_{pr} – число прецедентных прогнозных определений, использованных в прогнозных расчетах по данному прецеденту; $3\sigma_{sh}$ и $3\sigma_t$ – ошибка времени, рассчитанная, соответственно, по прецедентным ретропрогнозным определениям и на основании среднего отклонения аппроксимируемых данных от расчетной кривой; $L_{pn.}$ и A – средние значения уровня прогнозной нелинейности и аппроксимационно-экстраполяционного соотношения в прогнозных расчетах для данного прецедентного толчка. Нумерация зон в порядке убывания их опасности (по наиболее сильному прецедентному толчку) по всему каталогу JMA.

Также есть определенные основания ожидать, что форшоковая активизация в преддверии сильных землетрясений имеет циклический характер. В частности, среди потенциально опасных зон Японии, выявленных по текущему состоянию каталога JMA[4], выделяется кластер из пространственно сближенных и частично пересекающихся зон 2, 4, 6 с радиусом 150 км и локализацией в районе северо-восточной части о. Сикоку и городов Кобе и Осака с опасностью землетрясения класса M = 8.0–8.2 в 2021 г. В контексте полицикличности для нас имеет значение, что в принадлежащей к этому кластеру зоне 4 установлено сопряжение двух циклов потенциально опасного нарастания активности: начавшегося в сентябре 1943 г. цикла

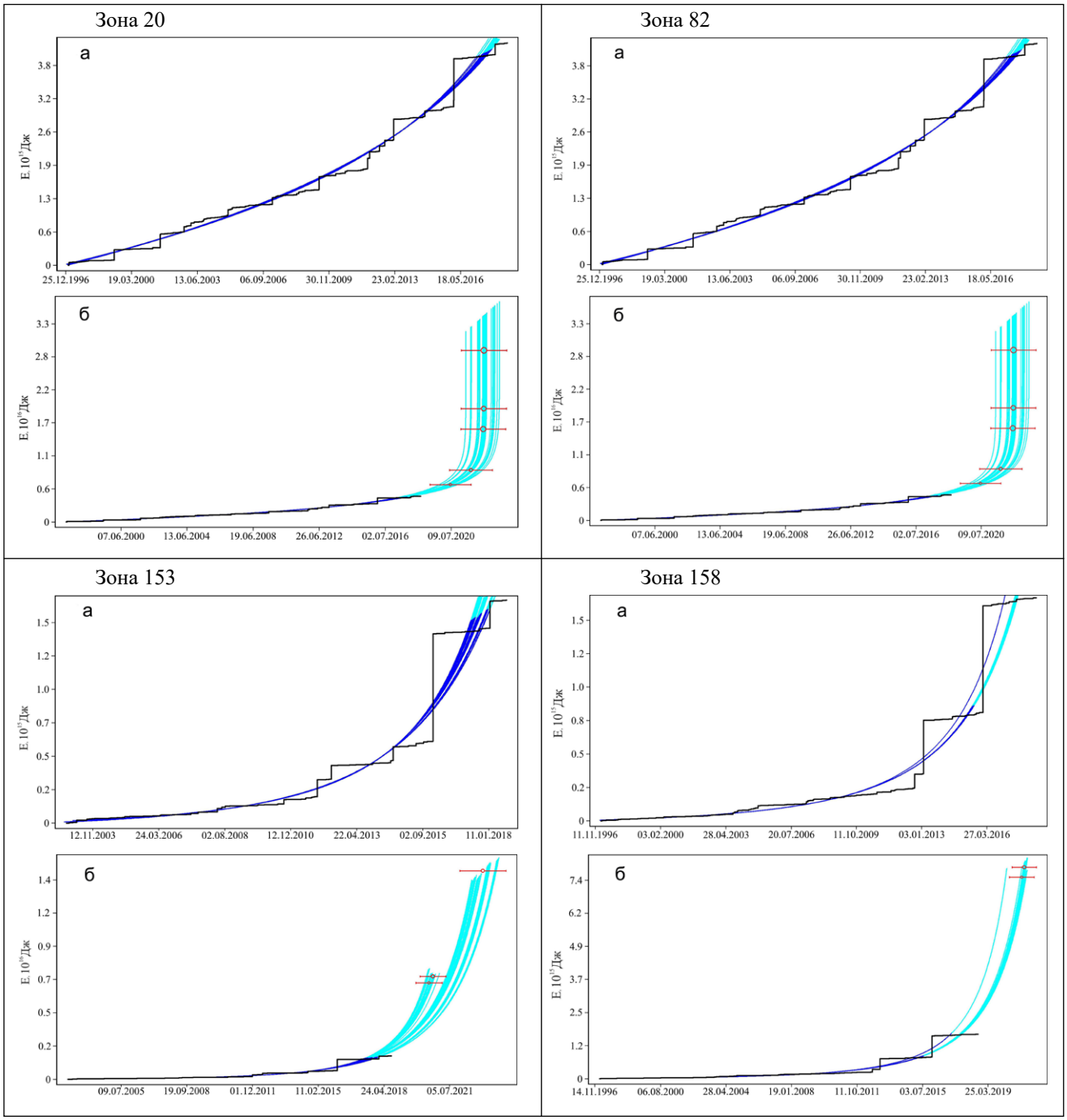


Рис. 5. Текущее (а) и прогнозируемое (б) развитие сейсмической активности в расчетных зонах.

[4] Малышев А.И., Малышева Л.К. Форшоковая прогнозируемость сильных землетрясений Японии по потоку сейсмической энергии (направлена для публикации в журнал «Физика Земли»).

постепенного нарастания потока энергии с относительно низкой прогнозной нелинейностью и более кратковременного цикла с высокой прогнозной нелинейностью. Последний цикл начался сразу после разрушительного землетрясения в г. Кобе 17 января 1995 г. (M = 7.3), и именно он имеет наиболее опасные тенденции нарастания активности (вплоть до имеющегося прецедента с M = 8.0).

Возможная полицикличность форшоковой подготовки сильных землетрясений и чрезвычайно широкий диапазон их прогнозной заблаговременности позволяют наметить условную этапность действий при выявлении потенциально опасных трендов сейсмической активности: 1) при прогнозной заблаговременности более 1 года – верификация выявленной опасности с помощью комплекса всех доступных прогностических методов; 2) при прогнозной заблаговременности от 1 года до 10 дней (особенно в зонах с сохраняющимися и верифицированными на 1 этапе тенденциями) – приведение в повышенную готовность служб ГО и ЧС; 3) при заблаговременности менее 10 дней в зонах с выявленными на 1-м и/или 2-м этапах и сохраняющимися опасными тенденциями – подключение к процессу прецедентно-экстраполяционных оценок систем автоматического оповещения с целью информирования об уточнениях временного периода опасности или о ее отмене. Как уже было сказано выше, в настоящее время прецедентно-экстраполяционные оценки можно использовать на уровне 1-го этапа, тогда как 2-й и 3-й этапы – цель будущих исследований, достижимая при условии встраивания оценочного алгоритма в процесс формирования сейсмических каталогов при одновременном наращивании вычислительных мощностей и качественном и количественном увеличении прецедентных данных.

На региональном уровне использование методики может иметь свою специфику, обусловленную характером сейсмичности, накопленной в каталогах информацией по региональному сейсмическому потоку, текущим состоянием регистрирующих сейсмических сетей и представлениями о минимальной энергии опасных землетрясений.

Рассмотрим региональную специфику использования методики на примере Сахалинской области. Наиболее высокий уровень региональной сейсмоактивности характерен для Курильской островодужно-субдукционной системы в связи с ее высокой тектонической активностью. Здесь инструментальными методами неоднократно зарегистрированы землетрясения уровня $M \geq 8$, сопровождающиеся цунами.

Остров Сахалин, где сконцентрирована большая часть населения и промышленности области, характеризуется умеренным уровнем сейсмической активности [Тихонов и др., 2017]. В течение 10 лет здесь регистрируется в среднем одно землетрясение с $M > 6$ и около 10 событий с $M > 5$. Гипоцентры сахалинских землетрясений располагаются на малых глубинах (до 30 км) и вдоль Курильской сейсмофокальной зоны (глубина 250–650 км). Глубокофокусные землетрясения, как правило, серьезной сейсмической опасности не представляют, тогда как малоглубинные могут приводить к значительным разрушениям и многочисленным жертвам. В частности, в 1995 г. землетрясением с M = 7.2 был полностью разрушен пос. Нефтегорск на северо-востоке острова. За одну ночь погибло 2240 человек, в том числе 308 детей, 720 получило серьезные ранения и только 30 не пострадали[5]. Это землетрясение, а также Углегорское 2000 г. с M = 7.0 в центральной части острова и Невельское 2007 г. с M = 6.2 на юге указывают на высокую сейсмическую опасность Сахалина [Закупин и др., 2019], несмотря на сравнительно умеренный уровень его сейсмической активности.

Наряду с обычной тектонической сейсмичностью Сахалин характеризуется техногенной и техногенно-триггерной сейсмичностью в связи с добычей полезных ископаемых на острове и в прилегающей акватории ([Тихонов, 2010; Семенова и др., 2020]; А.А. Степнов[6]). Есть основания ожидать [Foulger et al., 2018], что с планируемой интенсификацией разработки месторождений углеводородного сырья и других минеральных ресурсов техногенная и техногенно-триггерная составляющие

[5] https://pressa.tv/interesnoe/72899-neftegorsk-gorod-mertvyh-strashnoe-zemletryasenie-28-maya-1995-goda-8-foto-video.html.
[6] Степнов А.А. 2015. Комплексная автоматизированная система мониторинга для анализа современной сейсмичности Северного Сахалина: дис. … канд. физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 135 с.

региональной сейсмичности усилятся. В качестве примера можно привести ситуацию с месторождением Гронинген (Нидерланды), где добыча природного газа вызвала рост сейсмической активности [Thienen-Visser et al., 2015; Богоявленский, Богоявленский, 2018], что послужило причиной решения о досрочном прекращении эксплуатации месторождения в 2030 г.[7], а затем о переносе завершения эксплуатации на 2022 г.[8] при первоначальных планах использования месторождения до 2080 г.

При изучении регионального потока сейсмических событий на Сахалине используются [Тихонов и др., 2017; Закупин и др., 2019; Закупин, Богинская, 2020], как правило, три каталога. Данные за наиболее длительный период (1905–2005 гг.) наблюдений содержит региональный каталог землетрясений [Региональный… , 2006], где имеются сведения о более чем 3500 сейсмических событиях в районе о. Сахалин с $M \geq 3.0$. Каталог Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН, представленный в печати ежегодными выпусками (например, [Фокина и др., 2020]), включает в себя землетрясения $M \geq 3.0$ с 1997 г. Тем не менее реальное состояние сейсмичности Сахалина удалось оценить только после развертывания локальных сетей цифровых сейсмических станций на юге и севере острова. Поэтому наиболее надежным источником сведений о слабой сейсмичности Сахалина, по мнению [Тихонов и др., 2017], с 2003 г. стал третий каталог, формируемый на основе данных локальных сетей регистрирующих станций и без пропусков включающий в себя землетрясения с $M \geq 2.0$ [Каталог… , 2011].

Высокая опасность техногенных и техногенно-триггерных землетрясений в зонах жизнедеятельности человека обусловливает необходимость расширения диапазона потенциально опасных землетрясений вплоть до включения в него землетрясений с $M \geq 5$ [Закупин и др., 2018; Закупин, Семенова, 2018]. Возможность применения описанной методики к выявлению опасности техногенных и техногенно-триггерных землетрясений сомнений не вызывает. По крайней мере закономерности форшоковой активизации в преддверии сильных землетрясений, связанных с водохранилищами [Гупта, Растоги, 1979] ($M = 6.2$ в 1966 г. у оз. Кремаста в Греции, $M = 6.1$ в 1963 г. у оз. Кариба в Замбии – Родезии, $M = 5.0$ 13 сентября и $M = 6.4$ 10 декабря 1967 г. на плотине Койна в Индии), использовались для обоснования уравнения ДСПП в его первичном виде [Малышев, 1991]. Кроме того, первые попытки практического применения уравнения ДСПП относятся к изучению горных ударов в Южно-Уральском бокситоносном районе, где 28 мая 1990 г. произошел сильнейший горно-тектонический удар с разрушением подземных горных выработок шахты Кургазакская на площади 45 га.

Таким образом, региональная специфика возможного применения прецедентно-экстраполяционной методики в Сахалинской области обусловлена двумя типами сейсмической опасности, различающимися по локализации потенциально опасных землетрясений и их минимальной магнитуде.

Первый тип представлен тектоногенной сейсмической активностью Курильской островодужно-субдукционной системы. Здесь возможно использование описанной методики без существенных изменений с привлечением данных каталога [Региональный… , 2006] и каталога Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН, а также с использованием данных сопредельных регионов (Камчатского регионального сейсмического каталога для северной части Курильской системы и каталога JMA – для южной).

Второй тип сейсмической опасности связан с тектонической и техногенно-тектонической сейсмичностью о. Сахалин. Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности здесь возможна только на основе данных локальных сетей регистрирующих станций с использованием прецедентной базы по форшоковой подготовке землетрясений с $M \geq 5$. В связи с распространенностью техногенной сейсмичности [Foulger et al., 2018] представляется возможным создать подобную прецедентную базу при анализе данных Всемирного каталога Геологической службы США (USGS) с одновременным ужесточением требований по детерминированности форшоковых ретропрогнозов как минимум до уровня $L_{pn} \geq 0.98$. Использование данных локальных сетей с 2003 г. при определенном на основе

[7] https://ria.ru/20190225/1551301913.html.
[8] https://ria.ru/20191014/1559692698.html.

данных каталога JMA максимальном аппроксимационно-экстраполяционном соотношении A = 2.47 теоретически дает возможность получить прогнозную заблаговременность до 3.5 лет, что соответствует средне-долгосрочной прогнозируемости и 1-му этапу действий при выявлении потенциально опасных трендов сейсмической активности.

Заключение

Анализ форшоковых последовательностей по заблаговременности и точности ретропрогнозных определений свидетельствует о возможности их использования в средне-долгосрочном количественном прогнозе сильных землетрясений. В текущем состоянии прецедентно-экстраполяционная методика представляет собой первичный (исследовательский) вариант, нуждающийся в дальнейшей адаптации, отладке, выявлении и устранении мелких недочетов и (возможно) ошибок. Что касается развития самой методики, то здесь возможно некоторое повышение ее точности и эффективности при соответствующем увеличении вычислительных мощностей. Также представляется перспективным применение описанной методики к потоку «условных деформаций», тренды которого характеризуются меньшей полосой ошибок и поэтому по сравнению с потоком энергии могут показать более высокую точность в прогнозных экстраполяциях.

Тем не менее, по нашему мнению, она уже сейчас пригодна к практическому использованию. При этом необходимо учитывать, что методика, по крайней мере на данном этапе, не предназначена для использования в качестве самодостаточного и автономного метода прогноза сильных землетрясений. Она основывается на ретроспективном анализе прогнозируемости форшоковых последовательностей и позволяет, используя накопленный прецедентный опыт, выявлять зоны с потенциально опасными тенденциями нарастания сейсмической активности и рассчитывать время, в которое эти тенденции (при условии их сохранения) могут достичь опасного уровня. Акцентирование внимания на потенциально опасных зонах и расстановка приоритетов с учетом уровня опасности и имеющегося резерва времени делают возможной концентрацию всего комплекса прогностических методов в нужное время в определенной пространственной локализации: наземные и спутниковые деформационные наблюдения, исследования геофизических полей, режима грунтовых вод и дегазационных процессов, а также наращивание (при необходимости) плотности регистрирующей сети сейсмических станций. По нашему мнению, раннее обнаружение опасности с последующей концентрацией прогностических методов – ключ к успеху как в прогнозе сильных землетрясений, так и в получении новых высококачественных данных об их подготовке.

На примере текущего состояния каталога JMA выявлено 15 зон с потенциально опасным (для территории Сахалина и Курильских о-вов) нарастанием сейсмической активности. Для этих зон в 56 случаях по имеющимся прецедентам сильных ($M \geq 7$) землетрясений рассчитано возможное время их аналогов. Наибольшую опасность для рассматриваемой территории представляет зона 7, располагающаяся на севере о. Хоккайдо в непосредственной близости к южной части о. Сахалин. Развитие сейсмической активности в этой зоне имеет аналоги в форшоковой подготовке землетрясения с M = 8.0. Расчетное время аналогичного толчка соответствует 6 августа 2024 г. с допуском по времени немногим более года.

Региональная специфика возможного применения прецедентно-экстраполяционных оценок в Сахалинской области обусловлена двумя типами сейсмической опасности, различающимися по локализации потенциально опасных землетрясений и их минимальной магнитуде: тектоногенной сейсмической активностью Курильской островодужно-субдукционной системы и тектогенно-техногенной и техногенно-триггерной сейсмичностью о. Сахалин. При оценке опасности Курильской островодужно-субдукционной системы возможно использование описанной методики без существенных изменений с привлечением данных региональных каталогов. Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности на о. Сахалин возможна только на основе данных локальных сетей регистрирующих станций и требует расширения прецедентной базы по форшоковой подготовке землетрясений до уровня $M \geq 5$.

Список литературы

1. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В. **2018.** Проблемы газовой отрасли Нидерландов: рекордный рост сейсмической активности на месторождении Гронинген. *Газовая промышленность*, 4 (767): 126–135.

2. Гупта Х., Растоги Б. **1979.** *Плотины и землетрясения*. М.: Мир, 251 с.

3. Закупин А.С., Богинская Н.В. **2020.** Среднесрочные оценки сейсмической опасности на о. Сахалин методом LURR: новые результаты. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 160–168. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.160-168.169-177

4. 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

5. Закупин А.С., Богинская Н.В., Андреева М.Ю. **2019.** Методические аспекты исследования сейсмических последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине. *Геосистемы переходных зон*, 3(4): 377–389. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389

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. *Каталог землетрясений юга Сахалина за период с 2000 по 2010 г. (по данным автономных цифровых сейсмических станций).* **2011.** Авт: Ким Ч.У., Семенова Е.П., Жердева О.А. и др. Владивосток: Дальнаука, 357 с.

8. Малышев А.И. **1991.** Динамика саморазвивающихся процессов. *Вулканология и сейсмология*, 4: 61–72.

9. Малышев А.И. **2016.** Оценка прогнозируемости сейсмического потока на примере извержения вулкана Шивелуч 1964 г. *Вулканология и сейсмология*, 6: 22–36. https://doi.org/10.7868/S0203030616060055

10. Малышев А.И. **2019а.** Прогнозируемость сейсмического потока и сильных землетрясений Камчатки в 1962–2014 г. *Вулканология и сейсмология*, 1: 52–66. https://doi.org/10.31857/S0205-96142019152-66

11. Малышев А.И. **2019б.** Прогнозируемость потока сейсмической энергии Северной Америки. *Физика Земли*, 6: 59–75. https://doi.org/10.31857/S0002-33372019659-75

12. Малышев А.И. **2020.** Прогнозируемость потока сейсмической энергии Южной Европы и Средиземноморья. *Вулканология и сейсмология*, 1: 33–48. https://doi.org/10.31857/S0203030620010034

13. Малышев А.И., Малышева Л.К. **2018.** Прогнозируемость потока сейсмической энергии северо-западного обрамления Тихого океана по данным каталога USGS. *Геосистемы переходных зон*, 2(3): 141–153. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.141-153

14. Малышев А.И., Малышева Л.К. **2019.** Статистический алгоритм прогнозирования потока сейсмической энергии. В кн.: *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды Седьмой научно-технической конф.*, *29 сент. – 5 окт. 2019*, *Петропавловск-Камчатский.* Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 307–311.

15. *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.* **2006.** Авт: 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. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.

16. Семенова Е.П., Богинская Н.В., Костылев Д.В. **2020.** Углегорское землетрясение 13 сентября 2020 года (о. Сахалин): предпосылки возникновения и результаты наблюдений в эпицентральной зоне. *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 474–485. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.474-485

17. Тихонов И.Н., Михайлов В.И., Малышев А.И. **2017.** Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предваряющих сильные толчки, с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 5–14.

18. Тихонов И.Н. **2010.** О наведенной сейсмичности на шельфе острова Сахалин вблизи Пильтун-Астохского нефтегазоконденсатного месторождения. *Вестник ДВО РАН*, 3: 59–63.

19. Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Михайлов В.И. **2020.** Сахалин. *Землетрясения Северной Евразии*, 23 (2014): 152–161. https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.14

20. Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. **2018.** Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*, 178: 438–514. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008

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

22. Thienen-Visser K., Sijacic D., Nepveu M., Wees J., Hettelaar J. **2015.** Response of induced seismicity to production changes in the Groningen field. *TNO Report 2015 R11367*. 56 p. URL: https://www.nlog.nl/sites/default/files/tno%202015%20r11367_final_tno_report_nov%202015.pdf

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

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

УДК 550.343.6

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.084-098.099-112

TRANSLATION

Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region

Aleksandr I. Malyshev, Lidiia K. Malysheva*

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia

**E-mail: malyshev@igg.uran.ru*

Abstract. The paper describes the algorithm and the results of the seismic hazard estimate in the Sakhalin and Southern Kurils region based on the data of the Japan Regional Catalogue (JMA). A nonlinear differential equation of the second order is used as a mathematical model, and algorithms for optimization and predictability estimation are presented by the author's solutions. The prediction algorithm is based on the search for seismic activity zones in which the current activity trends correspond to foreshock sequences recorded before strong earthquakes (precedents) that have already occurred. The earthquake time is calculated with extrapolating the detected trends to the level of activity that occurred at the time of the precedent earthquake. By the example of precedent foreshock sequences in Japan, it is shown that the lead time of such a prediction reaches 10–15 years and its implementation is due to the preservation and stability of the identified trends. A map of potentially dangerous zones for Sakhalin and the Kuril Islands and some examples of calculating the time of strong earthquakes according to the JMA catalogue as of August 31, 2018 are presented. Action sequence in identifying the potentially dangerous trends in seismic activity and the specifics of possible use of the technique in the Sakhalin region are considered..

Keywords: earthquake, seismic energy, foreshock, precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard

For citation: Malyshev A.I., Malysheva L.K. Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 84–112. (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.084-098.099-112

Acknowledgment and Funding

The study was carried out within the framework of the state assignment of the IGG UB RAS No. AAAA-A19-119072990020-6.

Introduction

The seismic energy flux of earthquakes E shows a good predictability [Malyshev, Malysheva, 2018; Malyshev, 2019 a, b; Malyshev, 2020] when using the equations of dynamics of self-developing natural processes (DSNP-equations, see below) as a model. The obtained results demonstrated good prospects for the approximating-extrapolation approach for predicting both the strong earthquakes themselves and the subsequent aftershock decay of seismic activity.

When summarizing the obtained results, it was found [Malyshev, Malysheva, 2019] that the range of values of the α and k parameters in the DSNP-equation, which determine the foreshock predictability of strong earthquakes, is shifted relative to the whole predictability area to the lower left part of the $\alpha - \lg|k|$ diagram (Fig. 1), i.e. where the figurative points of the most slowly developing and long-lasting processes of activation are located. This makes it possible to differentiate the trends in the activation of the seismic energy flux by the α and k parameters, on the one hand, into conditionally safe (without precedents of termination by strong earthquakes), and on the other hand, into potentially dangerous ones that deserve close attention due to the precedents (often repeated) of these trends completions with strong earthquakes.

Processing of the data from the Japan Meteorological Agency (JMA) catalogue showed[1] that the predicted intensification of the seismic energy flux precedes 123 (out of 676) strong ($M \geq 7$) earthquakes. 87 536 precedents of these earthquakes falling into the range of admissible errors were found during the retrospective extrapolation of the foreshock trends into the "future". In particular, the strongest earthquake of that number – the Tohoku earthquake ($M = 9.0$) – has 150 prec-

[1] Malyshev A.I., Malyshev L.K. Foreshock predictability of strong earthquakes in Japan by the seismic energy flux (submitted for publication in the "Physics of the Solid Earth" journal).

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Малышев А.И., Малышева Л.К. Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил. *Translation by G.S. Kachesova.*

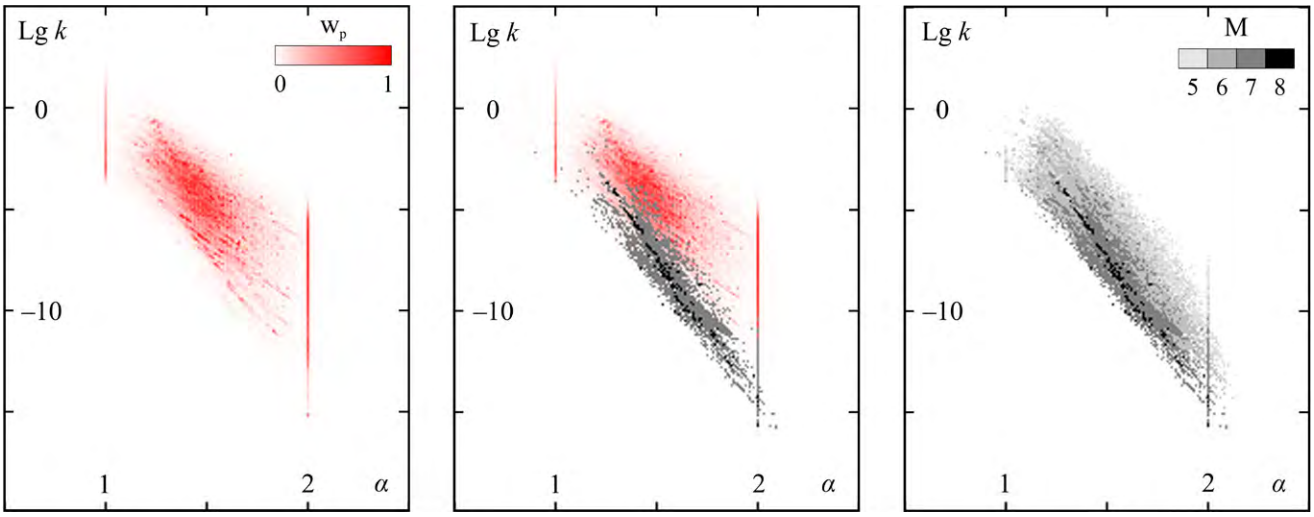


Figure 1. Distribution of the specific weight of predictability w_p for activating the seismic energy flux (left), foreshock predictability of strong earthquakes (right) and their combination (center) in the coordinates of the α – lg |*k*| parameters of the DSNP-equation, according to [Malyshev, Malysheva, 2019].

edents of falling into the range of retrospective prediction extrapolations.

In the distribution of retrospective prediction precedents by their lead time, more than 20 % of retrospective predictions have lead times from 3 to 10–15 years or more. Another 45 % of them has a lead time of 3 months to 3 years. Despite the large error band when simulating the energy flux (compared to "nominal strain" and the number of events [Malyshev, 2019b]), such a high lead time brings to rather high forecasting accuracy in these ranges. Moreover, it is in the range of more than 3 years that the lead time exceeds the time deviation at the moment of shock by an average of 5.82 times, and for the most accurate retrospective prediction for this range – by 37.18 times. This fact indicates the possibility of a medium and long-term quantitative estimate of the strong earthquakes hazard.

The results of the seismic hazard estimate according to the JMA catalogue are detailed for the Sakhalin and the Southern Kurils region, and the prospects for using the Sakhalin regional catalogue for these purposes are discussed in this work.

Research techniques

The DSNP-equation is used in the work [Malyshev, 1991]:

$$x'' = k\,|(x')^{\lambda} - (x'_0)^{\lambda}|^{\alpha/\lambda}, \qquad (1)$$

where x – calculated characteristic of the process, which models the available empirical data, x' и x'' – its first and second derivative with time t, k – proportionality factor, and the λ и α exponents determine the process nonlinearity close to the stationary state ($x' \approx x'_0$) and at significant a considerable distance from it ($x' >> x'_0$), respectively.

For predicting potentially catastrophic processes, the most interesting case is $x' >> x'_0$. Due to this, the following equation is of relevance as an approximation model:

$$x'' = k\,(x')^{\alpha}. \qquad (2)$$

The linearity of equation (2) solutions in ordinary or logarithmic coordinates simplifies the search for the best fit (optimization) between a particular solution of equation (2) and the actual data approximated with it [Malyshev, 2019a].

Spatial analysis of seismic data is carried out by spherical hypocentral samples with radii of 1.5, 3, 7.5, 15, 30, 60, 150 and 300 km. The centers of the samples are fixed and distributed over latitude, longitude, and depth with an offset step that is 1.5 times smaller than the sample's radius (i.e., 1, 2, 5, 10, 20, 40, 100, and 200 km, respectively), which provides spatial overlap of the samples and eliminates data omission for predictive estimates. In retrospective studies, each event in the analyzed catalogue is sequentially considered as a "current" event. The time moment of this event is taken as "present". The time preceding this event is considered "past", and the subsequent time – "future". Hereinafter, the predictability means finding the actual data of the "future" in the band of admissible errors

relative to the calculated curve in its extrapolation part. To estimate the predictability, the average deviation σ of the actual points from the calculated curve along the normal is used in the coordinates normalized to the range from 0 to 1. Then the approximation is extrapolated to the "future" until the normal distance of each subsequent (predicted) actual point to the calculated curve is in the band of admissible errors (±3σ) [Malyshev, 2016].

The relative accuracy of precedent predictions is estimated by the formula $\Delta = (t_{sh} - t_c)/\sigma_t$, where t_{sh} is the time of the main shock, t_c is the current time (prediction moment), σ_t is the average time deviation of the actual data from the calculated curve in its closest to the main shock point. In addition, two more quantitative characteristics – predicted nonlinearity L_{pn} and approximation and extrapolation ratio A – are important for precedent retrospective prediction definitions and predictive extrapolations. As will be shown below using the example of precedent retrospective predictions, the first characteristic reflects the stochasticity/determinacy of the main shock position relative to its calculated curve. It is calculated using the formula:

$$L_{pn} = 2\,[\Delta_x - (\Delta_x + \Delta_t)/2]/(\Delta_x + \Delta_t), \qquad (3)$$

where $\Delta_x=(x_{sh}-x_1)/(x_c-x_1)-1$, $\Delta_t=(t_{sh}-t_1)/(t_c-t_1)-1$; x_1 and t_1, x_c and t_c, x_{sh} and t_{sh} – the values of parameter and time in the origin point of the foreshock sequence, in the prediction point and in the moment of main shock, respectively. In so doing, in the case of retrospective predictions, the actual values of x_{sh} and t_{sh} are used, while in the case of predictive extrapolations – their calculated values. For the foreshock sequences, the L_{pn} value varies from 0 to 1.

The approximation and extrapolation ratio A shows, in turn, how many times the total foreshock trend exceeds its approximation component in the coordinates of the full trend, normalized to the range from 0 to 1. The statistical analysis of this ratio has been carried out according to the precedent retrospective prediction definitions and is used to estimate the limit of predictive extrapolations. In general, the A value can be determined by the ratio of the lengths of the corresponding sections of the calculated curve. However, in the case of step cumulative characteristics of the seismic flux (energy, conditional deformations, or the number of events), calculation by the following formula turns out to be the simplest and most effective:

$$A = 2/[(x_c - x_1)/(x_{sh} - x_1) + (t_c - t_1)/(t_{sh} - t_1)]. \qquad (4)$$

For foreshock retrospective predictability of the strong earthquakes in Japan, the approximation and extrapolation ratio does not exceed the value $A = 2.47$.

The regularities of the precedent foreshock preparation of strong ($M \geq 7$) earthquakes allow identifying similar trends in the seismic activity increase and their subsequent extrapolation based on the JMA catalogue, despite the existing 2-year delay in its update with operational seismic information. The prediction estimate of these trends dangers assumes the use of the data of precedent retrospective predictions and is based on the possibility of binding the time of the main shock to the rate of change in the x'_{sh} parameter at the point of the extrapolation curve closest to the main shock. For this purpose, a database of precedent retrospective predictions with the inclusion of information about the hypocentral radius of the sample, the exponent α and the coefficient k of equation (2), the rate of change in the x'_{sh} parameter at the calculated trend point closest to the shock, as well as information about the precedent main shock (magnitude, localization in space and time) is created.

The essence of the precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard consists in identifying potentially dangerous spatial zones, where such an increase in seismic activity is observed, which has historical precedents of completion by a strong earthquake. The quantitative aspect of the prediction corresponds to the calculation of the possible time of a similar earthquake based on the database of its precedent predictions. Since for each type of activation, determined by the radius of the sample and the values of the exponent α and the coefficient k in equation (2), there are can be several such precedents, the corresponding calculations of the possible time are carried out for each of them.

The prediction extrapolations algorithm provides for the following operations:

1. Search in the catalogue for incomplete (not came out of the band of admissible errors at the time of the catalogue end) prediction definitions, in which a tendency towards an increase in seismic activity is found.

2. Comparison of the type of an activity increase with the database of precedent retrospective predictions along the sample radius, exponent α

(with an accuracy of 0.01) and coefficient k (when comparing lg$k$ with an accuracy of 0.1). All cases of an activity increase that have no analoges in the database of precedent retrospective predictions are ignored.

3. The remaining cases are checked for strong shock precedents according to the retrospective database. In this case, all precedent prediction cases, for which the rate of change in the x'_{sh} parameter at the moment of the precedent shock is less than the current (at the moment of the catalogue completion) speed x' ($x'_{sh} < x'$), are excluded from consideration. The essence of this limitation is reduced, firstly, to excluding from consideration post-shock activity (the initial stage of aftershock sequences, which falls into the band of admissible errors of the foreshock activation), and secondly, to focusing attention at the early stages of foreshock preparation ($x' << x'_{sh}$), where the relative prediction accuracy is highest.

4. For each precedent retrospective prediction based on the rate of change in the x'_{sh} parameter, the time t_{sh} and the value of the x_{sh} parameter are calculated, at which, for a given type of an activity increase, its level will correspond to the level of the precedent shock:

$$t_{sh} = T_a - x'^{\,1-\alpha}_{sh}/[k(1-\alpha)] \text{ when } \alpha \neq 1$$
$$\text{or } t_{sh} = t_1 + \ln(x'_{sh}/x'_1)/k \text{ when } \alpha = 1, \quad (5)$$

$$x_{sh} = X_a - x'^{\,2-\alpha}_{sh}/[k(2-\alpha)] \text{ when } \alpha \neq 2$$
$$\text{or } x_{sh} = x_1 + \ln(x'_{sh}/x'_1)/k \text{ when } \alpha = 2. \quad (6)$$

Then the level of predicted nonlinearity L_{pn}, the approximation and extrapolation ratio A and the expected deviation in time σ_t of the actual data from the calculated trend at the moment of the main shock, are estimated. The value of this expected deviation is determined from the average deviation along the normal[2] of the approximated data and recalculated for the deviation in time at the calculated point (t_{sh}, x_{sh}) of the precedent shock. The definitions, for which $A > 2.47$, are not considered as having no precedents.

5. The revealed precedent retrospective predictions are grouped by the main shock. For each group, the calculated average time of the shock, its standard deviation σ_{sh}, as well as the average values of L_{pn}, A and σ_t are determined.

Initial data

As the initial data, the work uses the Japan Meteorological Agency (JMA) earthquake catalogue, which includes data from 1923 to the end of August, 2018[3]. By this time, the catalogue contained data on 3 498 071 earthquakes with a magnitude $M = -1.6 \ldots + 9.0$ at its modal value 0.6. The seismic energy flux E is considered as the x parameter, i.e. a cumulative amount of earthquakes energy. In this case, the energy of a single earthquake is estimated according to the existing relationship between its magnitude M and the energy class K [Kanamori, 1977]: $K = 1.5\,M + 4.8$.

Results and discussion

Examples of retrospective prediction extrapolations with a sufficiently high relative accuracy Δ and significant differences in predicted nonlinearity L_{pn} are shown in Fig. 2. Table 1 contains data on the main shock, sample and some characteristics of the foreshock trend corresponding to these examples. The first three graphs clearly illustrate the high lead time of these foreshock retrospective predictions (from 5 to 20 years), while the 4-month lead time of retrospective prediction 4 corresponds to the medium-short prediction range. Also, it can be seen in Fig. 2, that for a low predicted nonlinearity L_{pn} (graph 1 in Fig. 2), the position of the strong earthquake step in the energy flux is weakly determined by the band of admissible deviations. A strong earthquake in this band could have occurred both much earlier, and much later than its actual time, i.e. the stochasticity of a strong shock time increases with decreasing predicted nonlinearity. The latter is typical for the sequences of activation close to stationary development. On the contrary, with an increase in the predicted nonlinearity (graphs 2–4 in Fig. 2), the asymmetry of the band of admissible deviations by the parameter and time increases. As a result, the step of a strong earthquake, requiring a large admissible deviation by the parameter, is more and more rigidly determined by a reduction of the time interval, in which a strong shock can occur. This variability of stochasticity/determinacy of the process, depending on the level of predicted nonlinearity L_{pn}, have to be taken into account in

[2] In the coordinates from the first point of approximation area to the calculated shock, normalized to the range from 0 to 1.
[3] http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo_e.html; data are updated with a delay of about 2 years.

Table 1. **Data on main shock, sample and some characteristics of the foreshock trend for the examples of retrospective prediction extrapolations given in Fig. 1.**

		1	2	3	4
Earthquake					
Date		1936.11.03	2016.11.22	2010.02.27	2005.08.16
Time		05:45:57	05:59:46	05:31:25	11:46:25
M		7.4	7.4	7.2	7.2
Hypocenter	latitude	38.263°	37.355°	25.919°	38.150°
	longitude	142.062°	141.604°	128.680°	142.278°
	depth, km	61	24.5	37	42
Sample					
Radius, km		300	30	60	30
Center	latitude	40.588°	37.365°	26.175°	38.084°
	longitude	141.854°	141.784°	128.743°	142.081°
	depth, km	0	40	40	40
Foreshock trend					
$t_{sh} - t_c$, days		1749.696	6989.198	5355.244	132.471
$\Delta = (t_{sh} - t_c)/\sigma_t$		16.8551	22.0833	65.0781	658.6533
L_{pn}		0.5645	0.9264	0.9896	0.9999
A		1.9900	2.3711	2.2984	2.0816
α		0.5918	2.0000	1.4827	2.0000
lg k		1.9937	–14.8779	–8.4397	–11.9478

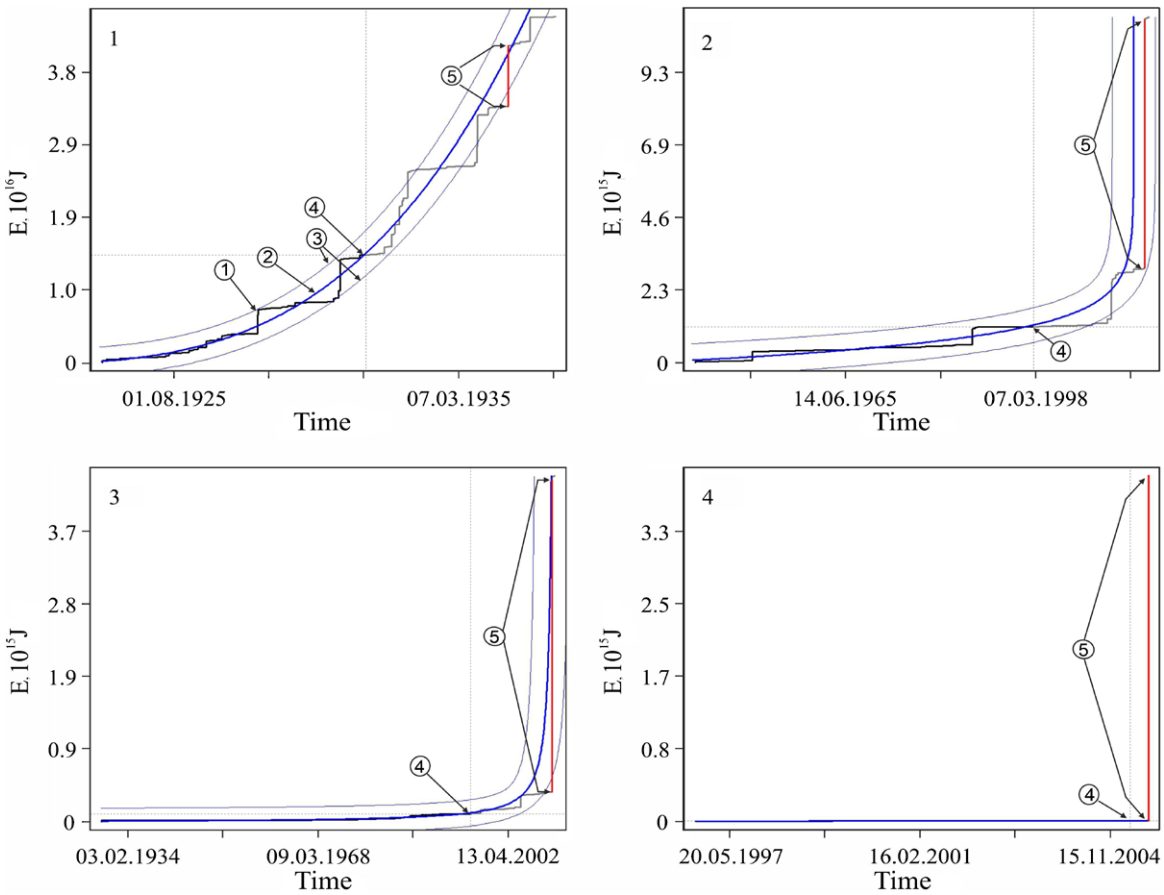


Figure 2. Examples of some foreshock extrapolations of the energy flux.
Figures in circles: 1 – actual data curve, 2 – calculated curve, 3 – errors band (±3σ), 4 – retrospective prediction moment, 5 – strong earthquake. The serial numbers of the graphs correspond to the data numbering in Table 1. The intersection of the vertical and horizontal dotted lines on the graphs corresponds to "current" values of time and parameter, there is "past" to the left and below this intersection, and "future" – to the right and above.

predictive extrapolation calculations of the time of strong earthquakes.

Resulting from the analysis of the JMA catalogue data, 186 zones were identified, for each of which there are at least 10 uncomplete (as of August 31, 2018) prediction definitions with a potentially dangerous increase in seismic activity. The regularities of activation in these zones have analogs in the foreshock preparation of 759 precedent earthquakes. The zones with localization to the north of 40° N are of importance for estimating the seismic and tsunami hazard on the territory of Sakhalin and the Southern Kurils. 15 potentially dangerous zones, the development trends of seismicity of which have analogs in the foreshock preparation of 56 strong precedent earthquakes (Fig. 3, Table 2), were identified here. The greatest danger for the territory concerned is the activity trend in zone 7 (Fig. 4), which has a radius of 150 km and is located in the north of Hokkaido Island in close proximity to the southern part of Sakhalin Island and the regional center Yuzhno-Sakhalinsk. The development of seismic activity in this zone has analogs in the foreshock preparation of the earthquake with $M = 8.0$, which occurred on December 21, 1946, with the epicenter to the south of Cape Shionomisaki. The estimated time of a similar shock in zone 7 corresponds to August 6, 2024 with a time error ($3\sigma_{sh}$) tolerance of a little over a year. Besides, less strong earthquakes are also possible in zone 7, since there are some precedents in the foreshock preparation of another 6 strong earthquakes of level M = 7.0–7.5 for some uncomplete predictions for this zone.

The current trends in the seismic activity development

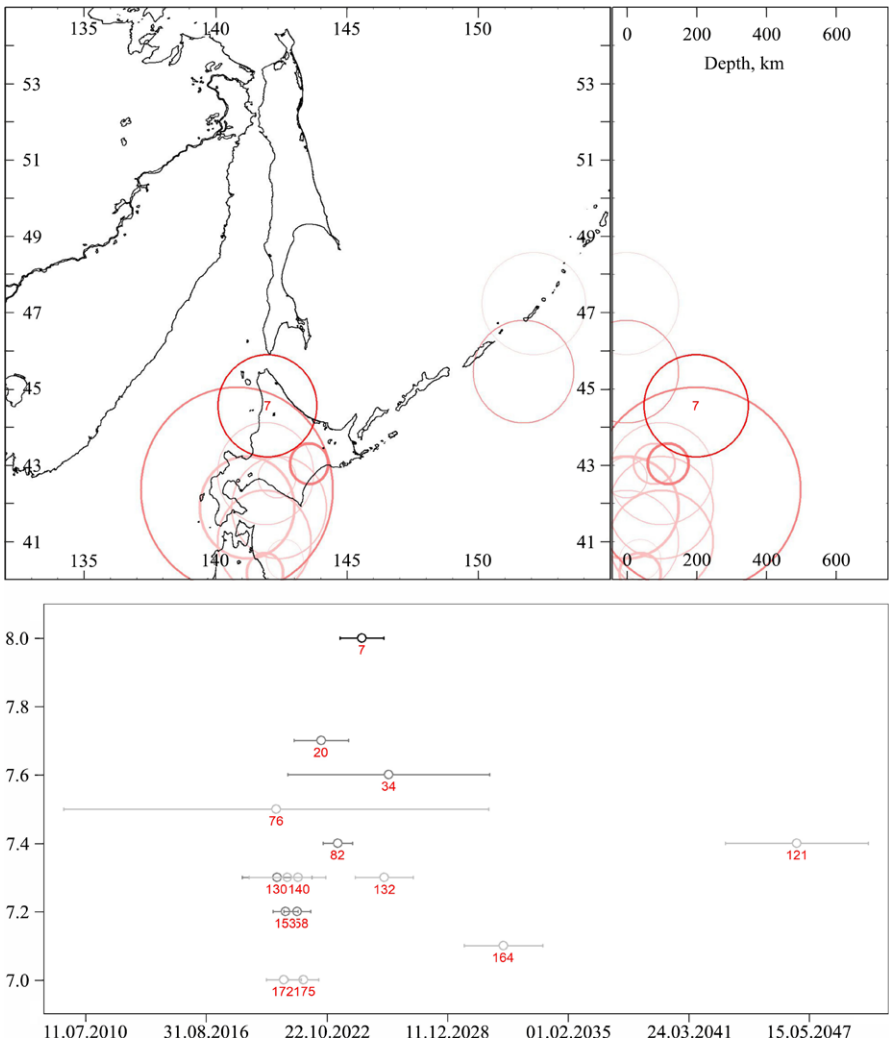


Figure 3. Map (top left) of the potentially dangerous zones of an increase in seismic energy flux according to the JMA catalogue as of August 31, 2018, its meridional sectional view (top right) and time base of the seismic hazard.
The circles show the position of the samples, in which potentially dangerous activity was identified; the brightness of the circle line reflects the danger level (according to the strongest possible precedent earthquake by the current regularities of activation), and its thickness is the number of identified potentially dangerous uncomplete prediction definitions; number 7 denotes the most dangerous zone, where uncompleted predictions have tendencies to activation, similar to the foreshock preparation of strong earthquakes up to the precedent earthquake with $M = 8.0$.
The time base of the seismic hazard is made up of the strongest precedent earthquake for each zone; zones numbering here and in Table 2 is in descending order of their danger (according to the strongest precedent shock) all over the JMA catalogue; the error in the estimated time of the precedent shock is shown by the maximum of the $3\sigma_{sh}$ and $3\sigma_t$ values (see Table 2); precedent shocks and their possible time error are shown in five gradations of shades from pale gray to black depending on the level of predicted nonlinearity L_{pn}: (<0.5, 0.5–0.8, 0.8–0.95, 0.95–0.99, 0.99–1.00), which reflects stochasticity/determinacy of the relationship between the shock time t_{sh} and the rate of change in the x'_{sh} parameter.

and their prediction extrapolation for zones 20, 82, 153, 158 illustrate (Fig. 5) a variety of precedent extrapolation estimates of the seismic hazard in different zones. Obviously, all 15 potentially dangerous zones deserve attention. However, the results obtained for these zones should be considered rather as working materials for expert groups on the seismic hazard estimate. In this case, first of all, it is necessary to take into account that all the results of the precedent extrapolative estimates presented here are conditional, i.e. they make sense, provided that the identified potentially dangerous trends did not come out the band of admissible errors for the period from August 2018 to the present (the period of the current data delay in the JMA catalogue) and remain relevant in the near future.

Therefore, at this stage, the method of approximation analysis and prediction extrapolation based on the DSNP-equation can and should be used as the primary method for spatial diagnostics of the presence of dangerous seismic trends and for estimating the available time reserves. It is logical to build this method of analysis and estimation into the very process of creating seismic catalogues, that document the flux of seismic events. In this case, firstly, any updating the catalogue data and/or their editing will automatically reflect the current situation of the dangerous trends in seismic activity, their appearance or disappearance (in case of activity going beyond the band of admissible deviations of the trend), and secondly, automation of precedent-extrapolation estimates makes it possible in the future to use these estimates as an independent prediction method at a short-term lead time

The 4th example of retrospective prediction extrapolations demonstrates the certain grounds for this in Fig. 2 and in Table 1. With a 4-month lead time, this retrospective prediction is characterized with an average time deviation (σ_t) of about 0.2 day at the moment of the shock. That is, the total band of admissible errors $\pm 3\sigma_t$ is only 1.2 days in this case. This, in turn, makes it practically possible to use short-term preventive measures during a dangerous period, for example, evacuating the population for this period from potentially dangerous buildings and structures and declaring high alert in the areas of tsunami risk. In addition, such medium-term and short-term predictions have a small radius of spatial localization, as a rule, which also eases their practical use.

Currently, the number of such retrospective predictions in the precedent base is not great, but there is a possibility of its updating due to the results of other catalogues processing. Strong earthquakes are rare, and the quality and detail of seismic activity recording have increased significantly in recent years and decades. In particular, the JMA catalogue contains information about only 0.5 million events for 80 years of observations in the XX century, while in the first two decades of the current century, the number of recorded earthquakes exceeded 3.5 million. It is natural to expect that detailed recording the seismic

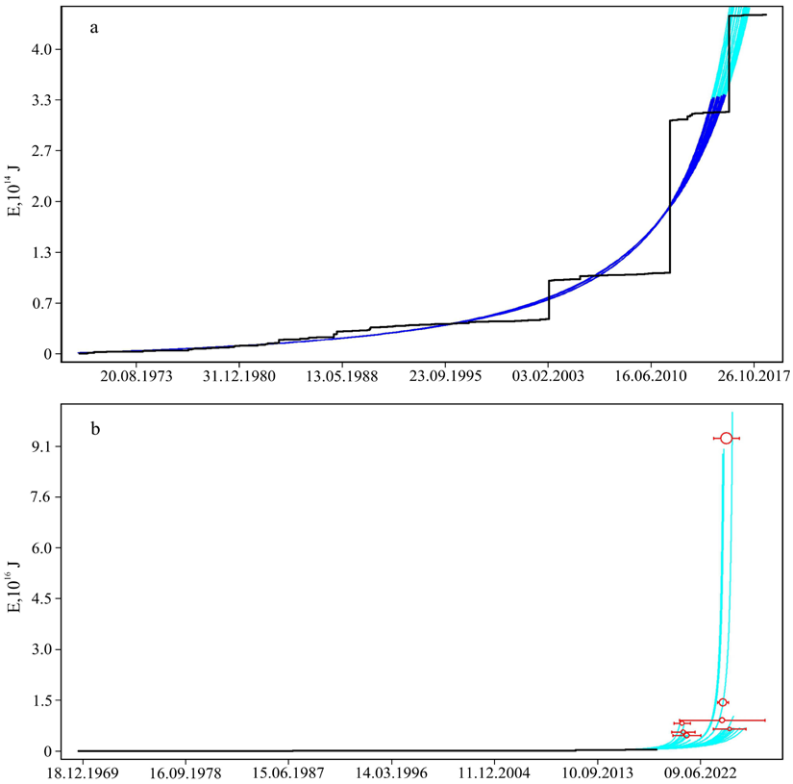


Figure 4. Current (top) and predicted (bottom) activity development according to the seismic energy flux *E* in zone 7. Here and in the figures below the calculated curves of the activity trends are shown in darker shade in the approximation part of the trend and in lighter shade – in the extrapolation one. The circles show the calculated location of the precedent earthquakes, size of the circles depends on magnitude (in this case, maximum precedent magnitude $M = 8.0$). The error in calculated time of the precedent shock is shown according to the maximum of $3\sigma_{sh}$ and $3\sigma_t$ values (see Table 2).

Table 2. **Localization of zones with a potentially dangerous activity, results of predictive calculations and precedent strong earthquakes**

Zone no.	Contemporary potentially dangerous activity							Prediction calculations							Precedent earthquake			
	Localization				Activation beginning	n	$L_{pn\ av.}$	M_{pr}	n_{pr}	Calculated date	Error, day		L_{pn}	A	Time	Hypocenter		
	Center			R, km							$3\sigma_{sh}$	$3\sigma_{t}$				Lat	Lon	Dep
	Lat	Lon	Dep															
7	44.554	141.972	200.0	150	1969.07.28	30	0.9799	7.0	1110	2024.11.15	505	362	0.9796	2.2687	2011.04.11 17:16	36.946	140.673	6.4
								7.1	2	2020.12.14	107	359	0.9845	2.1313	1982.03.21 11:32	42.067	142.600	40.0
								7.1	2	2020.10.30	219	253	0.9894	2.1692	2004.11.29 03:32	42.946	145.275	48.2
								7.2	8	2021.03.25	95	438	0.9801	2.1087	2005.08.16 11:46	38.150	142.278	42.0
								7.2	29	2024.04.02	1325	284	0.9849	2.2769	2008.06.14 08:43	39.030	140.881	7.8
								7.5	1	2024.04.26	0	162	0.9913	2.3291	1993.01.15 20:06	42.920	144.353	100.6
								8.0	3	2024.08.06	403	25	0.9986	2.3960	1946.12.21 04:19	32.935	135.849	24.0
20	42.353	140.816	200.0	300	1997.02.10	43	0.6756	7.0	1951	2020.06.24	455	401	0.5905	1.3073	2011.11.08 11:59	27.298	125.739	217.0
								7.2	3225	2021.09.21	476	344	0.7004	1.5396	2010.02.27 05:31	25.919	128.680	37.0
								7.5	129	2022.07.03	504	196	0.8783	1.9613	1964.06.16 13:01	38.370	139.212	34.1
								7.6	43	2022.06.20	502	232	0.8456	1.8721	1984.03.06 11:17	29.343	139.202	452.0
								7.7	215	2022.07.08	504	139	0.9214	2.1037	1998.05.04 08:30	22.379	125.437	35.0
34	43.028	143.557	120.0	60	1931.08.21	81	0.9740	7.0	5	2019.05.02	37	629	0.9701	2.3226	1938.05.23 16:18	36.574	141.324	0.0
								7.0	1	2019.08.06	0	1203	0.9571	2.0814	1971.08.02 16:24	41.301	143.529	54.0
								7.0	3	2020.09.14	93	1115	0.9344	2.2294	2000.01.28 23:21	43.008	146.744	58.5
								7.0	2	2023.03.19	18	1054	0.9344	2.3167	2002.03.31 15:52	24.233	121.970	55.0
								7.0	8	2018.02.03	232	1252	0.9360	2.1092	2008.05.08 01:45	36.228	141.608	50.6
								7.0	123	2022.04.03	3921	980	0.9643	2.1835	2014.07.12 04:22	37.050	142.321	33.0
								7.1	1	2019.09.10	0	705	0.9766	2.1940	2004.11.29 03:32	42.946	145.275	48.2
								7.1	4	2018.10.06	116	1071	0.9640	2.0926	2008.09.11 09:20	41.776	144.152	30.9
								7.3	2	2024.04.21	35	634	0.9779	2.2906	1995.12.04 03:01	44.560	150.130	57.0
								7.3	8	2021.03.01	3891	594	0.9720	2.3581	2001.12.18 13:02	23.893	122.815	8.0
								7.6	122	2025.12.13	1873	317	0.9886	2.3941	2011.03.11 15:15	36.121	141.253	42.7
76	45.446	151.714	0.0	150	1925.02.20	19	0.4602	7.4	16	2024.03.20	260	3717	0.4736	1.3683	1978.06.12 17:14	38.150	142.167	40.0
								7.5	3	2020.03.25	569	3947	0.3886	1.2231	1993.01.15 20:06	42.920	144.353	100.6
82	40.159	141.882	40.0	60	1995.01.07	102	0.9400	7.0	68	2020.04.18	313	771	0.8758	1.7441	2002.03.31 15:52	24.233	121.970	55.0
								7.0	99	2023.05.09	733	339	0.9470	2.3874	2014.07.12 04:22	37.050	142.321	33.0
								7.1	13	2020.12.13	22	591	0.9118	1.9835	1973.06.24 11:43	43.164	146.633	52.0
								7.4	234	2023.05.15	20	272	0.9572	2.4521	2016.11.22 05:59	37.355	141.604	24.5
121	47.228	152.103	0.0	150	1931.02.23	12	0.7511	7.4	12	2046.09.20	92	1331	0.7511	2.2419	1978.06.12 17:14	38.150	142.167	40.0

Zone no.	Contemporary potentially dangerous activity							Prediction calculations							Precedent earthquake			
	Localization				Activation beginning	n	$L_{pn\ av.}$	M_{pr}	n_{pr}	Calculated date	Error, day		L_{pn}	A	Time	Hypocenter		
	Center			R, km							$3\sigma_{sh}$	$3\sigma_t$				Lat	Lon	Dep
	Lat	Lon	Dep															
130	43.028	143.557	80.0	60	1933.10.16	48	0.9472	7.0	6	2029.11.13	223	2309	0.8941	1.9930	1978.03.23 12:15	44.800	149.417	60.0
								7.0	6	2029.11.11	223	2341	0.8920	1.9864	1995.12.04 03:04	44.706	150.526	0.0
								7.0	37	2026.11.22	2420	1260	0.9329	2.3562	2002.03.31 15:52	24.233	121.970	55.0
								7.0	3	2023.11.08	35	1389	0.9367	2.1987	2008.05.08 01:45	36.228	141.608	50.6
								7.0	94	2029.01.18	2686	875	0.9601	2.3891	2014.07.12 04:22	37.050	142.321	33.0
								7.3	6	2029.11.19	223	1916	0.9174	2.0705	1978.03.25 04:47	44.333	149.817	40.0
								7.3	3	2020.04.09	46	643	0.9734	2.3371	2001.12.18 13:02	23.893	122.815	8.0
								7.3	6	2029.11.20	223	973	0.9624	2.2575	2011.03.09 11:45	38.328	143.280	8.3
132	40.990	141.854	100.0	150	1995.01.07	33	0.7657	7.3	6039	2025.09.18	409	539	0.7657	2.2305	2011.03.09 11:45	38.328	143.280	8.3
140	42.669	142.337	0.0	60	1952.08.31	14	0.9993	7.0	1739	2021.10.25	458	32	0.9993	2.1371	2011.04.11 17:16	36.946	140.673	6.4
								7.3	4	2021.05.04	50	8	0.9998	2.1477	1994.10.09 16:55	43.558	147.802	0.0
								7.3	5	2023.09.07	145	10	0.9997	2.2083	2011.07.10 09:57	38.032	143.507	34.0
142	40.990	141.854	0.0	150	1995.01.07	13	0.8395	7.0	12	2020.01.24	29	860	0.8109	1.6931	2011.04.11 17:16	36.946	140.673	6.4
								7.3	79	2020.10.13	435	716	0.8438	1.8788	2011.03.09 11:45	38.328	143.280	8.3
153	41.881	141.212	0.0	150	2002.12.05	83	0.9061	7.0	24	2020.07.03	64	234	0.8968	1.9330	2011.04.11 17:16	36.946	140.673	6.4
								7.2	195	2023.02.16	408	170	0.9262	2.4000	1995.01.07 07:37	40.223	142.305	47.8
								7.2	641	2020.09.11	123	231	0.9003	1.9680	2008.06.14 08:43	39.030	140.881	7.8
158	42.772	141.911	100.0	150	1997.02.20	17	0.9328	7.0	16	2021.02.23	113	256	0.9313	2.2952	2011.04.11 17:16	36.946	140.673	6.4
								7.2	542	2021.04.19	175	249	0.9328	2.3125	2008.06.14 08:43	39.030	140.881	7.8
164	40.518	142.628	40.0	60	1995.01.07	12	0.6886	7.0	1	2023.08.01	0	645	0.7577	2.0178	1938.05.23 16:18	36.574	141.324	0.0
								7.0	173	2026.11.16	1792	765	0.6843	2.1397	2002.03.31 15:52	24.233	121.970	55.0
								7.0	4	2024.06.07	933	597	0.7748	2.1323	2014.07.12 04:22	37.050	142.321	33.0
								7.1	8	2031.10.21	120	723	0.7302	2.4500	1982.03.21 11:32	42.067	142.600	40.0
172	41.881	142.424	0.0	150	2009.06.12	30	0.5161	7.0	2233	2020.08.09	129	323	0.5159	1.6681	2005.03.20 10:53	33.739	130.176	9.2
								7.0	6	2021.04.02	276	352	0.5544	1.7229	2013.04.19 12:05	45.301	150.957	125.0
175	41.881	142.424	100.0	150	2003.10.09	23	0.5150	7.0	23	2021.08.08	32	289	0.5150	1.5550	2013.04.19 12:05	45.301	150.957	125.0

Note. Lat, Lon – latitude and longitude (°), respectively; Dep – depth, km; R – radius of a zone; n – number of uncomplete prediction definitions; $L_{pn\ av.}$ – average level of predicted nonlinearity throughout a zone; M_{pr} – magnitude of precedent strong earthquake; n_{pr} – number of precedent prediction definitions used in prediction calculations for a given precedent; $3\sigma_{sh}$ and $3\sigma_t$ – time error, calculated by precedent retrospective prediction definitions, respectively, and on the basis of average deviation of approximated data from the calculated curve; $L_{pn.}$ and A – average values of predicted nonlinearity level and approximation and extrapolation ratio in prediction calculations for a given precedent shock. Numbering of zones in their danger descending order (by the strongest precedent shock) throughout the JMA catalogue.

preparation of strong earthquakes in the future will inevitably result in the updating the precedent base with more qualitative data. And this, in turn, will allow the methodology to be extended to short-term prediction extrapolations.

There are also certain grounds to expect that foreshock activation before strong earthquakes is of a cyclical nature. In particular, among the potentially dangerous zones of Japan, identified by the current state of the JMA catalogue[4], there is a cluster of spatially close and partially intersecting zones 2, 4, 6 with a radius of 150 km and localization in the region of the northeastern part of Shikoku Island and the cities of Kobe and Osaka with a danger of an earthquake of M = 8.0–8.2 class in 2021. In the context of polycyclicity, it is impor-

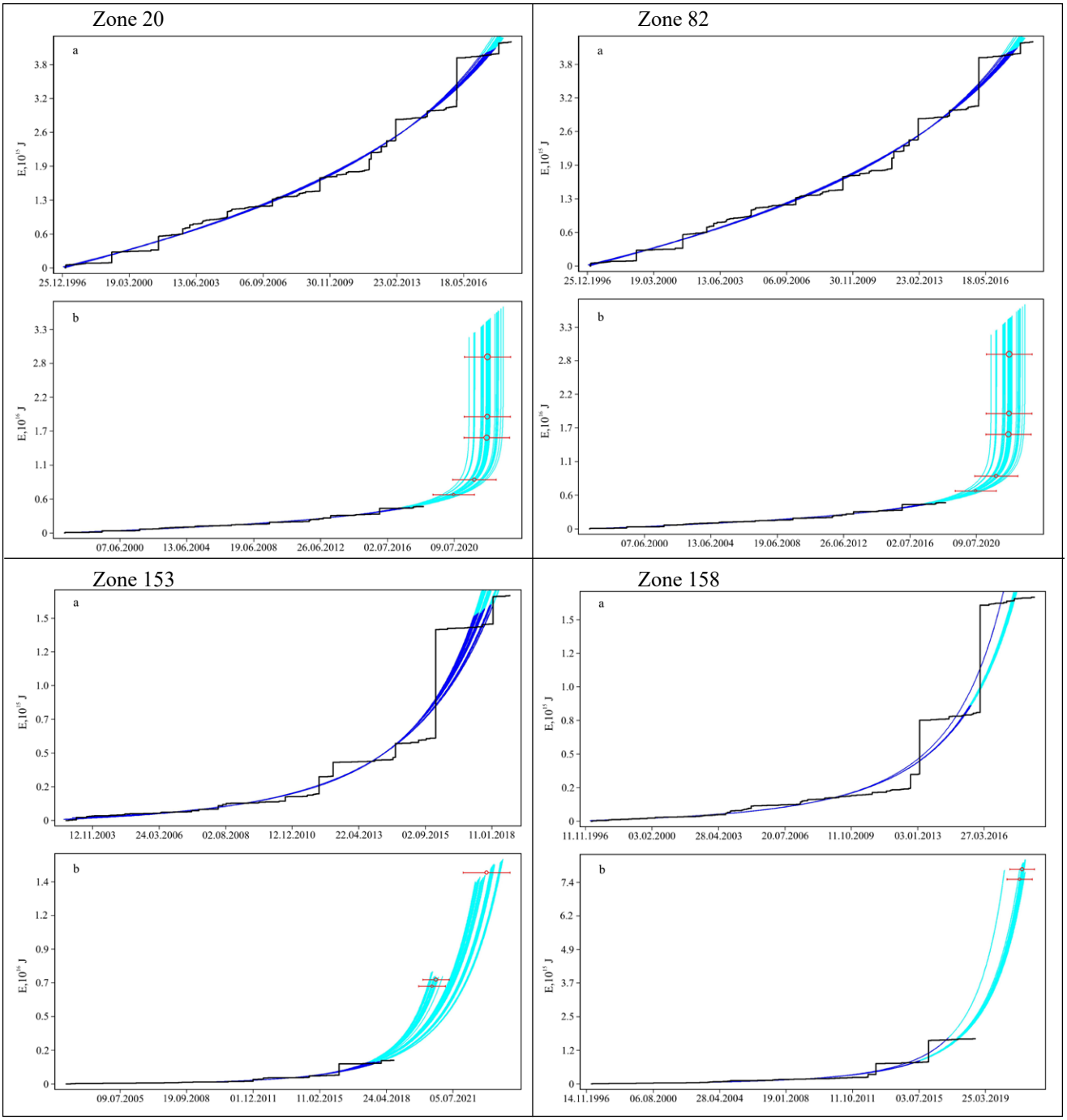


Figure 5. Current (a) and predicted (b) seismic activity development in calculated zones.

[4] Malyshev A.I, Malyshev L.K. Foreshock predictability of strong earthquakes in Japan by the seismic energy flux (submitted for publication in the "Physics of the Solid Earth" journal).

tant for us that in zone 4 belonging to this cluster, two cycles of a potentially dangerous activity increase were established: the cycle of a gradual increase in the energy flux with a relatively low predicted nonlinearity began in September, 1943 and a shorter cycle with a high predicted nonlinearity. The last cycle began immediately after the devastating earthquake in Kobe on January 17, 1995 (M = 7.3), and it is this cycle that has the most dangerous trends of activity increase (up to the existing precedent with M = 8.0).

The possible polycyclic nature of the foreshock preparation of strong earthquakes and an extremely wide range of their predicted lead times allow us to outline a conditional staging of actions when identifying potentially dangerous trends in seismic activity: 1) with a predicted lead time of more than 1 year – verification of the identified danger using a set of all available prediction methods; 2) with a predicted lead time from 1 year to 10 days (especially in areas with persistent and verified at stage 1 trends) – bringing the civil defense and emergency services into high readiness; 3) with a lead time of less than 10 days in zones with identified at the 1st and/or 2nd stages and persisting dangerous trends – connection to the process of precedent-extrapolation estimates of automatic warning systems in order to inform about the clarification of the time period of the danger or about its cancellation. As already mentioned above, at present, precedent-extrapolation estimates can be used at the level of the 1st stage, while the 2nd and 3rd stages are the goal of future researches, achievable provided that the estimation algorithm is integrated into the process of seismic catalogues generating with simultaneous increase of computing power; and qualitatively and quantitatively increasing precedent data.

At the regional level, the use of the method can have its own specificity, due to the nature of seismicity, information on the regional seismic flux gathered in catalogues, the current state of the recording seismic networks and ideas about the minimum energy of dangerous earthquakes.

Let's consider the regional specifics of using the method on the example of the Sakhalin region. The highest level of regional seismic activity is characteristic of the Kuril island-arc-subduction system due to its high tectonic activity. Instrumental methods have repeatedly recorded earthquakes of level $M \geq 8$ here, accompanied by a tsunami.

Sakhalin Island, where most of the population and industry of the region is concentrated, is characterized by a moderate level of seismic activity [Tikhonov et al., 2017]. For 10 years, an average of one earthquake with $M > 6$ and about 10 events with $M > 5$ is recorded here. The hypocenters of Sakhalin earthquakes are located at shallow depths (up to 30 km) and along the Kuril seismic focal zone (depth 250–650 km). Deep-focus earthquakes, as a rule, do not pose a serious seismic hazard, while shallow earthquakes can bring to significant destruction and numerous casualties. In particular, an earthquake with M = 7.2 completely destroyed the town of Neftegorsk in the northeast of the island in 1995. In one night, 2 240 people died, including 308 children, 720 were seriously injured and only 30 were not hurt[5]. This earthquake, as well as the Uglegorsk one in 2000 with M = 7.0 in the central part of the island and the Nevelsk one in 2007 with M = 6.2 in the south indicate the high seismic hazard of Sakhalin [Zakupin et al., 2019] despite the relatively moderate level of its seismic activity.

Along with the usual tectonic seismicity, Sakhalin is characterized with technogenic and technogenic-trigger seismicity in connection with the mining on the island and in the adjacent water area ([Tikhonov, 2010; Semenova et al., 2020]; AA Stepnov[6]). There is reason to expect [Foulger et al., 2018] that with the planned intensification of the development of hydrocarbon deposits and other mineral resources, the technogenic and technogenic-trigger components of regional seismicity will increase. The situation with the Groningen field (Netherlands) may be cited as an example, where natural gas production has caused an increase in seismic activity [Thienen-Visser et al., 2015; Bogoyavlensky, Bogoyavlensky, 2018], which was the reason for the decision to prematurely terminate the operation of the field in 2030[7], and then to postpone the completion of operation to 2022[8], with the initial plans for using the field until 2080.

As a rule, three catalogues are used when studying the regional flux of seismic events in Sakhalin [Tikhonov et al., 2017; Zakupin et al., 2019;

[5] https://pressa.tv/interesnoe/72899-neftegorsk-gorod-mertvyh-strashnoe-zemletryasenie-28-maya-1995-goda-8-foto-video.html
[6] Stepnov A.A. 2015. Complex automated monitoring system for analysis of contemporary seismicity of the North Sakhalin: diss. ... cand. in phys. and math. sciences. Yuzhno-Sakhalinsk, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS, 135 p.
[7] https://ria.ru/20190225/1551301913.html
[8] https://ria.ru/20191014/1559692698.html

Zakupin, Boginskaya, 2020]. The data for the longest period of observations (1905–2005) is contained in the regional earthquake catalogue [Regional..., 2006], where there is information about more than 3500 seismic events with $M \geq 3.0$ in the area of Sakhalin Island. The catalogue of the Sakhalin branch of the Federal Research Center of the UGS RAS, presented in print in annual issues (for example, [Fokina et al., 2020]), includes earthquakes with $M \geq 3.0$ since 1997. Nevertheless, the real state of seismicity in Sakhalin was able to be estimated only after the deployment of local networks of digital seismic stations in the south and north of the island. Therefore, the most reliable source of information about the weak seismicity of Sakhalin, according to [Tikhonov et al., 2017], since 2003, has become the third catalogue formed on the basis of data from local networks of recording stations [Earthquake... , 2011] and without omissions including earthquakes with $M \geq 2.0$.

The high danger of technogenic and technogenic-trigger earthquakes in the zones of human activity necessitates expanding the range of potentially dangerous earthquakes up to including earthquakes with $M \geq 5$ [Zakupin et al., 2018; Zakupin, Semenova, 2018]. The possibility of using the described method to identify the danger of technogenic and technogenic-trigger earthquakes is not in doubt. At least the regularities of foreshock activation before strong earthquakes associated with the reservoirs [Gupta, Rastogi, 1979] ($M = 6.2$ in 1966 near Lake Kremasta in Greece, $M = 6.1$ in 1963 near Lake Kariba in Zambia – Rhodesia, $M = 5.0$ on September 13 and $M = 6.4$ on December 10, 1967 at the Coyne Dam in India), were used to substantiate the DSNP-equation in its primary form [Malyshev, 1991]. In addition, the first attempts to practically apply the DSNP-equation relate to the study of rockbursts in the South Ural bauxite region, where on May 28, 1990, a strong tectonic rockburst occurred with the destruction of underground mine workings of the Kurgazakskaya mine over an area of 45 ha.

Thus, the regional specificity of the possible use of the precedent-extrapolation method in the Sakhalin region is due to two types of seismic hazard, which differ in the localization of potentially dangerous earthquakes and their minimum magnitude.

The first type is represented by tectonogenic seismic activity of the Kuril island-arc-subduction system. Here it is possible to use the described methodology without significant changes using the data of the catalogue [Regional... , 2006] and the catalogue of the Sakhalin branch of the Federal Research Center of the UGS RAS, as well as using the data of adjacent regions (Kamchatka regional seismic catalogue for the northern part of the Kuril system and the JMA catalogue for the southern part).

The second type of the seismic hazard is associated with the tectonic and technogenic-tectonic seismicity of Sakhalin Island. A precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard is possible here only on the basis of data from local networks of recording stations using the precedent base for foreshock preparation of earthquakes with $M \geq 5$. Due to the prevalence of technogenic seismicity [Foulger et al., 2018], it seems possible to create a similar precedent base for analysis of data from the US Geological Survey (USGS) World Catalogue with a simultaneous requirement strengthening for the determinism of foreshock retrospective predictions to at least $L_{pn} \geq 0.98$. The use of data from local networks since 2003, with the maximum approximation and extrapolation ratio $A = 2.47$ determined on the basis of the JMA catalogue data, theoretically makes it possible to obtain a predicted lead time of up to 3.5 years, which corresponds to medium-term and long-term predictability and the 1st stage of actions when identifying the potentially dangerous trends of seismic activity.

Conclusion

Analysis of the foreshock sequences in terms of the lead time and accuracy of retrospective prediction determinations indicates the possibility of their use in the medium-term and long-term quantitative prediction of strong earthquakes. In the current state, the precedent-extrapolation method is a primary (research) variation, that needs further adaptation, debugging, identification and correction of minor weaknesses and (possibly) errors. With regard to the development of the method itself, there may be some increase in its accuracy and efficiency with a corresponding increase in computing power. It also seems promising to apply the described method to the "conditional deformations" flux, the trends of which are characterized by a smaller error band and therefore, in comparison with the energy flux, can show a higher accuracy in prediction extrapolations.

Nevertheless, we suppose it to be already suitable for practical use. It should be borne in mind that the method, at least at this stage, is not intend-

ed to be used as a self-sufficient and autonomous for forecasting strong earthquakes. It is based on a retrospective analysis of the predictability of foreshock sequences and allows identifying the areas with potentially dangerous trends of increasing seismic activity and to calculate the time, at which these trends (providing they persist) can reach a dangerous level, using the accumulated precedent experience. Focus on potentially hazardous areas and prioritizing with consideration to the level of danger and the available reserve of time make it possible to concentrate the entire complex of prediction methods at the right time in a certain spatial localization: ground and satellite deformation observations, studies of geophysical fields, groundwater regime and degassing processes, and also growing (if necessary) the density of the recording network of seismic stations. In our opinion, early detection of a hazard with the subsequent concentration of prediction methods is the key to success both in predicting strong earthquakes and in obtaining new high-quality data on their preparation.

On the example of the current state of the JMA catalogue, 15 zones with the potentially dangerous (for the territory of Sakhalin and the Kuril Islands) seismic activity increase have been identified. For these zones, according to the available precedents of strong ($M \geq 7$) earthquakes, the possible time of their analogs was calculated in 56 cases. The greatest danger for the concerned territory is zone 7, located in the north of Hokkaido Island in close proximity to the southern part of Sakhalin Island. The development of the seismic activity in this zone has analogs in the foreshock preparation of an earthquake with $M = 8.0$. The estimated time for a similar shock corresponds to August 6, 2024, with a time tolerance of just over a year.

The regional specificity of the possible application of precedent-extrapolation estimates in the Sakhalin region is due to two types of seismic hazard, which differ in the localization of potentially dangerous earthquakes and their minimum magnitude: tectonogenic seismic activity of the Kuril island-arc-subduction system and tectonogenic-technogenic and technogenic-triggering seismicity of Sakhalin Island. When estimating the hazard of the Kuril island-arc-subduction system, it is possible to use the described method without significant changes with the involvement of data from the regional catalogues. The precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard on Sakhalin Island is possible only on the basis of data from local networks of recording stations and requires expanding the precedent base for foreshock preparation of earthquakes to a level of $M \geq 5$.

References

1. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V. **2018.** Problems of the Netherlands gas production: record-breaking seismic activity at the Groningen field. *Gas Industry*, 4 (767): 126–135. (In Russ.).

2. Fokina T.A., Safonov D.A., Kostylev D.V., Mikhaylov V.I. **2020.** Sakhalin. *Zemletriaseniia Severnoi`Evrazii* = [*Earthquakes of the Northern Eurasia*], 23 (2014): 152–161. (In Russ.). https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.14

3. Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. **2018.** Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*, 178: 438–514. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008

4. Gupta H.K., Rastogi B.K. **1979**. *Dams and earthquakes*. Moscow: Mir Publ., 251 p. Transl. from Engl.: Gupta H.K., Rastogi B.K. **1976**. *Dams and earthquakes*. Amsterdam: Elsevier.

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

6. [*Earthquake catalogue of the south of Sakhalin Island from 2000 to 2010 (according to data of the autonomous digital seismic stations)*]. **2011.** Authors: Kim Ch.U., Semenova E.P., Zherdeva O.A. et al. Vladivostok: Dal'nauka, 357 p.

7. Malyshev A.I. **1991.** Dynamics of self-developing processes. *Volcanology & Seismology*, 4: 61–72. (In Russ.).

8. Malyshev A.I. **2017(2016).** Estimating the predictability of the seismicity rate: The 1964 eruption of Shiveluch Volcano. *J. of Volcanology and Seismology*, 10(6): 347–359. https://doi.org/10.1134/S0742046316060051

9. Malyshev A.I. **2019a.** The predictability of seismicity and large earthquakes: Kamchatka 1962 to 2014. *J. of Volcanology and Seismology*, 13(1): 42–55. https://doi.org/10.31857/s0205-96142019152-66

10. Malyshev A.I. **2019b.** Predictability of the rate of seismic energy in North America. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 55(6): 864–878. https://doi.org/10.1134/S106935131906003X

11. Malyshev A.I. **2020.** Predictability of the seismic energy flux: Southern Europe and the Mediterranean. *J. of Volcanology and Seismology*, 14(1): 30–43. https://doi.org/10.1134/S0742046320010030

12. Malyshev A.I., Malysheva L.K. **2018.** Predictability of seismic energy rate in northwest frame of Pacific Ocean on the base of USGS catalogue. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 141–153. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.141-153

13. Malyshev A.I., Malysheva L.K. **2019.** [Statistical analysis of the seismic energy flux forecasting]. In: *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii: Trudy Sed'moy nauchno-tekhnicheskoy konf., 29 sent. – 5 okt. 2019, Petropavlovsk-Kamchatskiy* [*Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East: Proceedings of the seventh scientific and technical conference, September 29 – October 5, 2019, Petropavlovsk-Kamchatskiy*]. Obninsk: FITs EGS RAN, 307–311. (In Russ.).

14. *Regional catalogue of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005*. Poplavskaya L.N. (ed.) **2006.** Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN, 103 p. (In Russ.).

15. Semenova E.P., Boginskaya N.V., Kostylev D.V. **2020.** Uglegorsk earthquake on September 13, 2020 (Sakhalin Island): preconditions for the occurrence and the results of observations in the epicentral zone. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 474–485. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.474-485

16. Thienen-Visser K., Sijacic D., Nepveu M., Wees J., Hettelaar J. **2015.** Response of induced seismicity to production changes in the Groningen field. *TNO Report 2015 R11367*. 56 p. URL: https://www.nlog.nl/sites/default/files/tno%202015%20r11367_final_tno_report_nov%202015.pdf

17. Tikhonov I.N. **2010.** Induced seismicity in the vicinity of Piltun-Astokh gas and oil field on Sakhalin island shelf. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 3: 59–63. (In Russ.).

18. Tikhonov I.N., Mikhaylov V.I., Malyshev A.I. **2017.** Modeling the Southern Sakhalin earthquake sequences preceding strong shocks for short-term prediction of their origin time. *Russian J. of Pacific Geology*, 11(1): 1–10. https://doi.org/10.1134/s1819714017010092

19. Zakupin A.S., Boginskaya N.V. **2020.** Mid-term assessments of seismic hazards on Sakhalin Island using the LURR method: new results. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 160–177. (In Russ & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.160-168.169-177

20. 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 = Bull. KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*, 5: 83–98. (In Russ.). https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98

21. 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

22. Zakupin A.S., Boginskaya N.V., Andreeva M.Yu. **2019.** Methodological aspects of the study of seismic sequences by SDP (self-developing processes) on the example of the Nevel'sk earthquake on Sakhalin. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 377–389. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389

Об авторах

МАЛЫШЕВ Александр Иванович (https://orcid.org/0000-0002-4306-8000; ResearcherID P-8918-2016), кандидат геолого-минералогических наук наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, Екатеринбург, malyshev@igg.uran.ru

МАЛЫШЕВА Лидия Константиновна (https://orcid.org/0000-0002-2784-2182; ResearcherID W-3978-2017), научный сотрудник, Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, Екатеринбург, malysheva@igg.uran.ru

About the Authors

MALYSHEV Aleksandr I. (https://orcid.org/0000-0002-4306-8000; ResearcherID P-8918-2016), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, malyshev@igg.uran.ru

MALYSHEVA Lidiia K. (https://orcid.org/0000-0002-2784-2182; ResearcherID W-3978-2017), Researcher, The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, malysheva@igg.uran.ru

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

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

УДК 550.34.06 https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.113-120.121-127

Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. M_W = 7.5

© 2021 *А. С. Прытков*, Н. Ф. Василенко*

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

Резюме. 25 марта 2020 г. на севере Курильской островной дуги к юго-востоку от о. Парамушир произошло сильное землетрясение с магнитудой M_W = 7.5. Гипоцентр землетрясения находился под океаническим склоном глубоководного желоба в погружающейся Тихоокеанской литосферной плите. Землетрясение явилось сильнейшим с 1900 г. сейсмическим событием для внешней относительно желоба области протяженностью около 800 км. Оно оказалось самым сильным и для прилегающего к эпицентру трехсоткилометрового участка Курило-Камчатской зоны субдукции. В статье обобщены данные о землетрясении: рассмотрены его тектоническая позиция, параметры очага, особенности развития афтершокового процесса, а также косейсмическое смещение на ближайшей GNSS-станции непрерывной регистрации. Проведенный анализ не позволил однозначно выделить рабочую плоскость подвижки в очаге. Тем не менее изучение особенностей возникновения внешнего землетрясения представляет научный интерес, поскольку напряженное состояние области изгиба погружающейся Тихоокеанской литосферной плиты отражает межплитовое взаимодействие в зоне субдукции.

Ключевые слова: северные Курильские острова, Парамуширское землетрясение, афтершоки, механизм очага, косейсмические смещения

The March 25, 2020 M_W 7.5 Paramushir earthquake

Alexander S. Prytkov, Nikolay F. Vasilenko*

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

Abstract. The strong earthquake with moment magnitude M_W = 7.5 occurred on March 25, 2020, in the North Kurils to the southeast of the Paramushir Island. The hypocenter of the earthquake was located under the oceanic rise of deep-sea trench in the subducting Pacific lithospheric plate. This earthquake has been the strongest seismic event since 1900 for an area about 800 km long of the outer rise of the trench. It also was the strongest earthquake for the 300-kilometer long area of the Kuril-Kamchatka subduction zone adjacent to the epicenter. The article summarizes the data on the Paramushir earthquake. Tectonic position of the earthquake, source parameters, features of the aftershock process development, as well as coseismic displacement of the nearest continuous GNSS station are considered. The performed analysis did not allow us to clearly determine the rupture plane in the source. Nevertheless, the study of the features of the outer-rise earthquake is a matter of scientific interest, since the stress state of the bending area of the subducting Pacific lithospheric plate reflects the interplate interaction in the subduction zone.

Keywords: North Kurils, Paramushir earthquake, aftershocks, focal mechanism, coseismic displacements

Для цитирования: Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. M_W = 7.5. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 2, с. 113–127. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.113-120.121-127

For citation: Prytkov A.S., Vasilenko N.F. The March 25, 2020 M_W 7.5 Paramushir earthquake. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 113–127. (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.113-120.121-127

Благодарности
Авторы благодарны Д.А. Сафонову за предоставленные материалы определения тензора момента Парамуширского землетрясения.

Acknowledgements
The authors are grateful to Dmitry Safonov for the provided materials of determining of the Paramushir earthquake moment tensor.

Введение

25 марта 2020 г. в 02:49 по Гринвичскому времени на севере Курильской островной дуги в ~200 км к юго-востоку от о. Парамушир произошло землетрясение с моментной магнитудой M_W = 7.5 (рис. 1). По данным Сахалинского и Камчатского филиалов Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН и КФ ФИЦ ЕГС РАН), его макросейсмический эффект в г. Северо-Курильск достигал 5–6 баллов по шкале MSK-64. В ближайших к эпицентру населенных пунктах п-ова Камчатка сотрясения ощущались с интенсивностью 4–5 баллов[1]. Землетрясение вызвало цунами, визуально определенная высота волн которого на побережье о. Парамушир составила около 0.5 м [Королев, Королев, 2020]. В соответствии с географическим положением очага это сейсмическое событие в работе названо Парамуширским землетрясением. Используемый далее термин «внешний» обозначает отношение к внешнему склону тихоокеанского глубоководного желоба.

Парамуширское землетрясение 25.03.2020 г. произошло в погружающейся Тихоокеанской литосферной плите, оно относится к сильным и редким внешним сейсмическим событиям в Курило-Камчатской зоне субдукции. По данным USGS, землетрясение является сильнейшим с 1900 г. на прилегающем внешнем склоне глубоководного желоба протяженностью около 800 км, а также самым сильным для трехсоткилометрового участка Курильской дуги[2].

Анализ внешней сейсмичности представляет научный интерес, поскольку напряженное состояние области изгиба погружающейся Тихоокеанской литосферной плиты отражает межплитовое взаимодействие в зоне субдукции [Christensen et al., 1988]. С этой целью в работе обобщены и проанализированы данные о внешнем Парамуширском землетрясении M_W = 7.5.

Тектоническая позиция и параметры очага землетрясения

Взаимодействие Тихоокеанской и Североамериканской литосферных плит проявляется в особенностях пространственного распределения очагов землетрясений (рис. 1). Эпицентры большинства сейсмических событий, включая самые сильные с M > 8, располагаются между островной дугой и осью глубоководного желоба и относятся к области межплитового контакта литосферных плит (тип A). Напряжения в очагах таких землетрясений ориентированы преимущественно в горизонтальном направлении перпендикулярно островной дуге и по типу сейсмодислокаций квалифицируются как взбросовые и надвиговые.

Внутриплитовая сейсмичность зоны субдукции (тип B) отчетливо маркирует сейсмофокальную зону мощностью около 70 км, падающую под острова [Тараканов, Андреева, 2012]. По типу сейсмодислокаций сейсмические события здесь являются сбросами или взбросами в зависимости от того, происходят они в нижней, испытывающей растяжение, или в верхней, находящейся в состоянии сжатия части субдуцирующей Тихоокеанской плиты [Сафонов и др., 2015].

Сейсмические события, происходящие во внешней относительно желоба зоне (тип C), пространственно располагаются в приокеаническом склоне глубоководного желоба и восточнее от него. Здесь возможны сильные (в том числе цунамигенные) внутриплитовые землетрясения со сбросовым типом сейсмодислокаций [Тихонов и др., 2008]. Вероятной причиной возникновения подобных землетрясений является изгиб верхней эластичной части погружающейся плиты [Сафонов и др., 2015]. Однако в данном районе нередки случаи возникновения землетрясений с взбросовым типом подвижек в очагах, что отражает состояние сжатия преджелобной области.

С 1964 г. в Курило-Камчатской зоне субдукции зафиксировано лишь два внешних землетрясения с магнитудой M_W > 7.0 (рис. 1). Сильнейшим из них явилось второе сейсмическое событие 13.01.2007 г. M_W = 8.1 дуплета Симуширских землетрясений 2006–2007 гг., которое возникло на глубине 10 км в условиях растяжения. По типу сейсмодислокаций оно квалифицируется как сброс в результате процесса релаксации напряжений в зоне субдукции после землетрясения 15.11.2006 г.

[1] ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». URL: http://www.ceme.gsras.ru/new/struct (accessed 16.01.2021).
[2] USGS – The United States Geological Survey. URL: https://earthquake.usgs.gov/ (accessed 15.01.2021).

M_W = 8.3 [Steblov et al., 2008; Ammon et al., 2008]. В 2009 г. северо-восточнее Симуширских землетрясений на глубине 45 км в условиях сжатия произошло землетрясение с M_W = 7.4. Анализ, проведенный в работе [Ye et al., 2021], показал, что это событие не связано с процессами контакта литосферных плит в зоне субдукции и является афтершоком Симуширского землетрясения 13.01.2007 г. M_W = 8.1, хотя произошло в обстановке сжатия и имело взбросовую подвижку в очаге.

Парамуширское землетрясение оперативно обработано региональными центрами и мировыми сейсмологическими агентствами (таблица; рис. 1). Расхождения в определениях координат эпицентра по данным сейсмологических агентств, работающих с различными инструментальными сетями наблюдений и методиками обработки информации, незначительны. По положению гипоцентра землетрясения можно уверенно заключить, что событие произошло во внешней зоне на глубине ~55 км под океаническим склоном в погружающейся Тихоокеанской плите.

Решения механизма очага землетрясения достаточно схожи (таблица). Только региональные определения КФ ФИЦ ЕГС РАН [Каталог механизмов…] и ИМГиГ ДВО РАН несколько отличаются от результатов международных агентств, что может являться следствием различного количества сейсмических станций, используемых для расчетов, и их географического положения. Для всех полученных решений ось сжатия субгоризонтальна

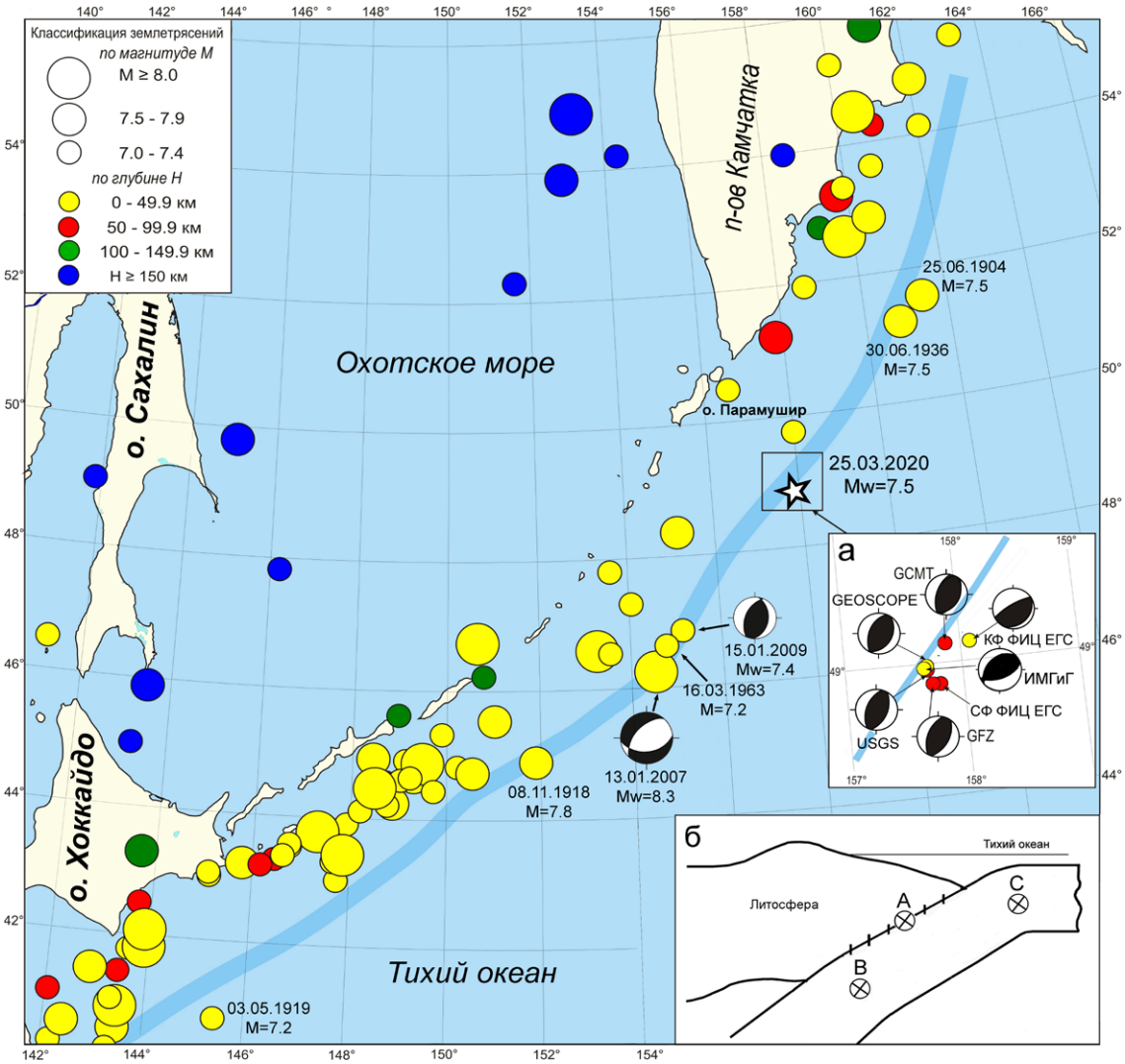


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Курило-Камчатского региона с M ≥ 7.0 за период 1900–2020 гг. по данным USGS (https://earthquake.usgs.gov/). (а) – эпицентры и механизмы очага Парамуширского землетрясения показаны по данным сейсмологических агентств (таблица); (б) – схематическая модель зоны субдукции. A, B, C – типы сейсмических событий в зоне субдукции.

и ориентирована по направлению СЗ–ЮВ, ось растяжения – субвертикальна. Тип подвижки по обеим плоскостям сейсморазрыва – чистый взброс (либо взброс с незначительной сдвиговой компонентой). Простирание нодальных плоскостей очага практически совпадает с простиранием глубоководного желоба.

Афтершоковый процесс

Афтершоковый процесс в очаговой зоне Парамуширского землетрясения проанализирован по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН [Каталог землетрясений …]. После основного толчка с M_L = 7.7 в течение первых суток региональными станциями зарегистрировано более 120 сейсмических событий; за март–декабрь 2020 г. – около 400 афтершоков, 3 из которых имели магнитуду $M_L \geq 5.5$ (рис. 2).

Пространственное распределение афтершоков позволило оконтурить эпицентральную область землетрясения. По ширине она составляет около 50 км и вытянута в направлении СВ–ЮЗ вдоль глубоководного желоба на 95 км (рис. 2). Линейные размеры очаговой зоны удовлетворяют эмпирическим оценкам (85 × 41 км) для внутриплитовых землетрясений M_W = 7.5 ($M_0 \sim 2 \cdot 10^{20}$ Нм) [Blaser et al., 2010; Skarlatoudis et al., 2016]. Эпицентр главного толчка приурочен к южному краю облака афтершоков, которые локализованы в интервале глубин 15–53 км. Пространственное распределение афтершоков по глубине (поперечный разрез вкрест простирания глубоководного желоба по линии AA') не дает визуального представления о возможной рабочей плоскости падения сейсморазрыва.

Первый сильный афтершок M_L = 5.7 зарегистрирован 25 марта на глубине ~50 км. 7 апреля на такой же глубине произошел афтершок M_L = 5.5 (M_W = 5.1), 14 июня на глубине ~30 км – сейсмическое событие M_L = 5.9 (M_W = 5.1). Разность между магнитудами главного события и сильнейшего афтершока для M_L составляет 1.8, для M_W – 2.4. Согласно эмпирическому закону Бота эта разность должна находиться в пределах 0.6–1.7 [Bath, 1965; Shcherbakov, Turcotte, 2004]. Следовательно, ожидаемая магнитуда M_L сильнейшего афтершока должна составить 6.0–7.1, а M_W – 5.8–6.9. Такая особенность свидетельствует о наличии дефицита сильных событий в афтершоковом процессе. Временной ход и график кумулятивной энергии афтершоков

Таблица. **Основные параметры Парамуширского землетрясения по данным региональных центров и международных сейсмологических агентств**

Источник	Координаты эпицентра		Глубина, км	Магнитуда	Нодальные плоскости		
	φ ° N	λ° E			Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)
ИМГиГ ДВО РАН	48.99	157.69	(32)	M_W = 7.1	223/69	37/56	69/105
СФ ФИЦ ЕГС РАН	48.88	157.80	72	M_{LH} = 7.5			
КФ ФИЦ ЕГС РАН	49.11	158.08	48	M_L = 7.7 M_C = 7.5	240/39	72/19	97/70
USGS	48.964	157.696	57.8 (61)	M_W = 7.5 mb = 7.1	201/23	47/43	88/92
GCMT	49.11	157.87	(52.6)	M_S = 7.5 M_W = 7.5	194/32	48/43	78/103
GFZ	48.89	157.74	51 (43)	M_W = 7.4	199/28	46/43	84/96
GEOSCOPE Observatory	48.986	157.693	(45)	M_W = 7.5	203/30	51/39	86/95

Примечания. В скобках дана глубина модельного центроида. M_W – моментная магнитуда, M_{LH} – локальная магнитуда по поверхностным волнам, M_L – локальная магнитуда, полученная путем пересчета из энергетического класса по номограмме С.А. Федотова, M_C – спектральная кода-магнитуда, M_S – магнитуда по поверхностным волнам, mb – магнитуда по объемным волнам. ИМГиГ ДВО РАН – Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук; СФ ФИЦ ЕГС РАН – http://www.ceme.gsras.ru/new/struct; КФ ФИЦ ЕГС РАН – http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php; USGS – https://earthquake.usgs.gov/; GCMT – Global Centroid Moment Tensor, https://www.globalcmt.org; GFZ – Global Centroid Moment Tensor, https://www.globalcmt.org; Geoscope Observatory – French Global Network of broad band seismic, http://geoscope.ipgp.fr.

после главного толчка до конца 2020 г. показан на рис. 3. Низкий уровень кумулятивной энергии ΣE афтершоков ($3.0 \cdot 10^{13}$ Дж), значение которой в $2.1 \cdot 10^3$ раза меньше энергии главного события ($6.3 \cdot 10^{16}$ Дж), также свидетельствует о дефиците сейсмичности.

График повторяемости афтершоков Парамуширского землетрясения приведен на рис. 4. Уровень представительности каталога по магнитуде M_L составляет ~3.6. Линейный характер графика сохраняется для интервала магнитуд 3.6–4.4. Его наклон b = 1.08 ± 0.10 (коэффициент корреляции R = 0.97 ± 0.09) соответствует среднему для Курило-Охотского региона показателю, десятилетнее значение которого b = 1.0 [Сафонов и др., 2020], а также близок к среднему многолетнему значению для зоны сейсмичности «Тихий океан» Камчатского региона и прилегающих к нему областей [Левина и др., 2013]. Количество афтершоков в диапазоне 4.5–4.7 гораздо ниже, чем следовало бы ожидать исходя из распределения более слабых землетрясений.

Убывание числа землетрясений со временем после главного толчка дает представление о характере развития сейсмического процесса. Согласно эмпирическому закону Омори [Omori, 1894] в течение первых 2 недель афтершоковый процесс (рис. 5) развивался в соответствии с показателем p = –1.28 ± 0.18, что соответствует среднемировому значению затухания во времени сейсмической активности в очагах землетрясений. Небольшая активизация в 4–5-е сутки сменилась снижением сейсмической активности на 7-й день. Спад сейсмичности отображен на кумулятивном графике числа землетрясений (рис. 6), где убывающая во времени по гиперболическому закону афтершоковая последовательность переходит в новый режим. На 20-е сутки (15.04.2020 г.) после основного толчка этот режим приблизился к линейному, что может свидетельствовать

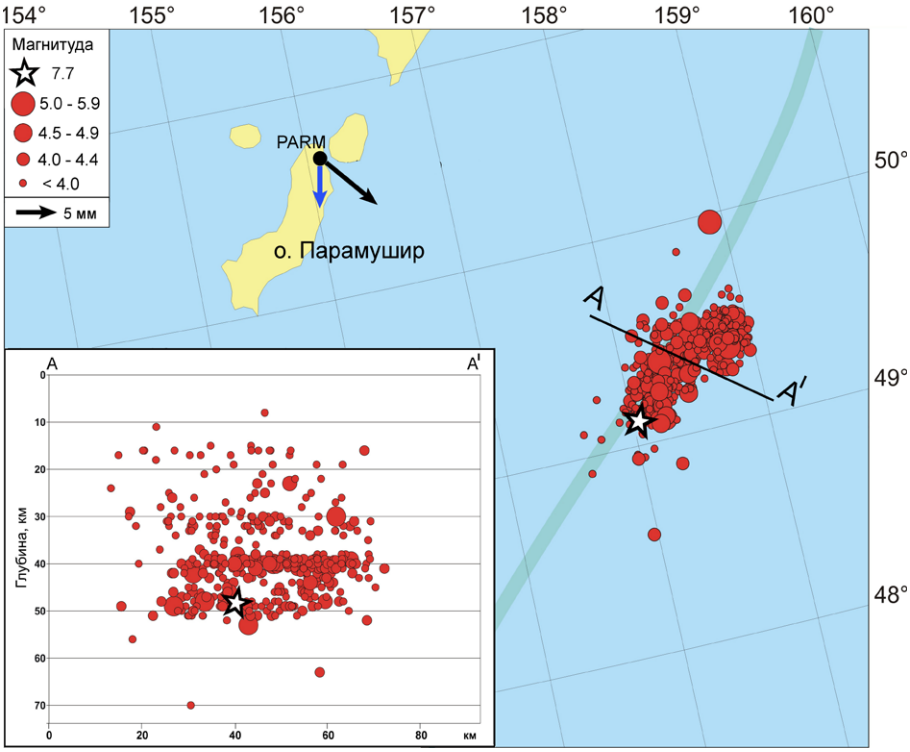


Рис. 2. Карта афтершоков Парамуширского землетрясения по данным каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН [Каталог землетрясений…]. Горизонтальное косейсмическое смещение GNSS-станции PARM показано черной стрелкой, вертикальное – синей. На врезке показан поперечный разрез области афтершоков по линии AA'. Главный толчок обозначен звездочкой.

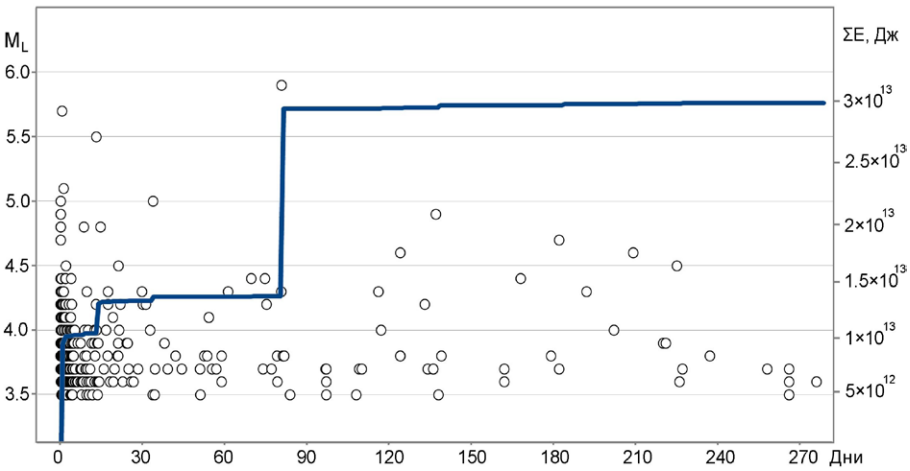


Рис. 3. Временной ход и график кумулятивной энергии афтершокового процесса за период 25.03.2020 – 31.12.2020.

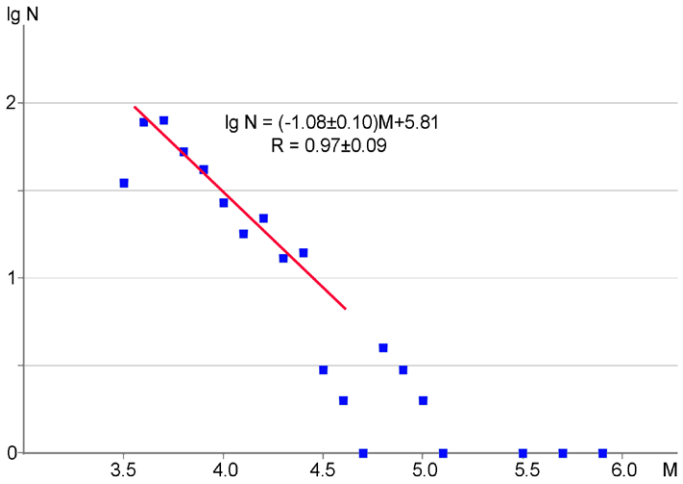


Рис. 4. График повторяемости афтершоков Парамуширского землетрясения. За начало отсчета взято время основного события. Аппроксимация линейной части графика представлена сплошной прямой.

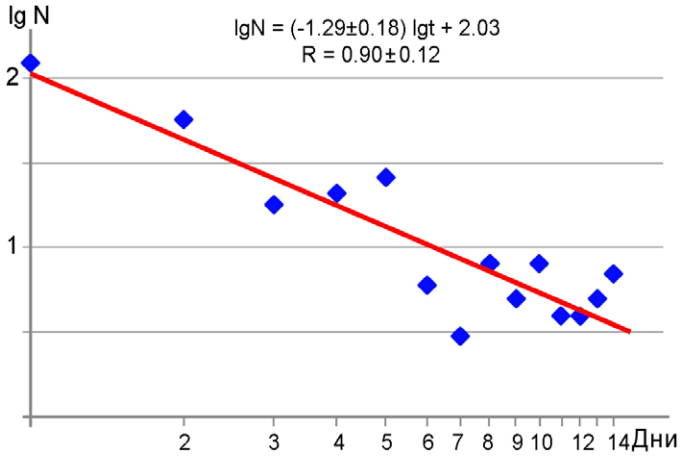


Рис. 5. График затухания афтершокового процесса в течение 2 недель после Парамуширского землетрясения.

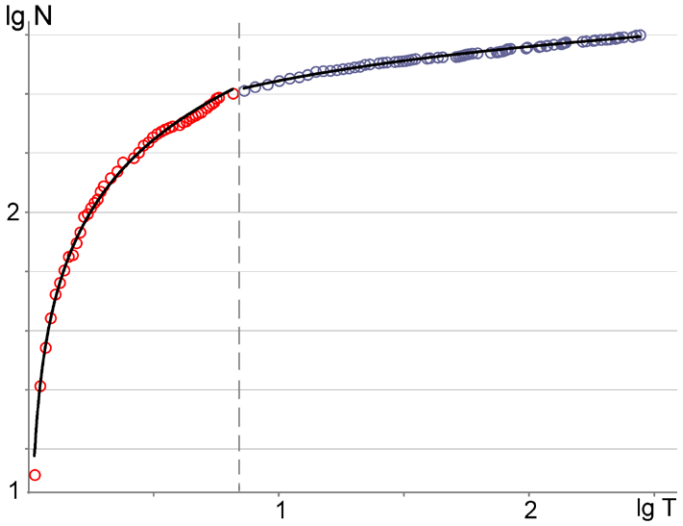


Рис. 6. Кумулятивный график числа афтершоков Парамуширского землетрясения. Вертикальная пунктирная линия показывает время изменения афтершокового режима.

о переходе сейсмического процесса в стадию фона. Примечательно, что афтершоки 7.04.2020 г. $M_L = 5.5$ и 14.06.2020 г. $M_L = 5.9$ не вызвали дополнительной активизации затухающего во времени процесса.

Косейсмическое смещение GNSS-станции PARM

Косейсмические смещения земной поверхности служат основой для построения дислокационных моделей, которые позволяют однозначно определить рабочую плоскость сейсморазрыва в результате сильного землетрясения. Ближайшая региональная GNSS (Global Navigation Satellite System) станция непрерывной регистрации PARM расположена в г. Северо-Курильск на расстоянии 220 км к северо-востоку от эпицентра Парамуширского землетрясения. Регистрация данных на станции осуществляется 24-часовыми суточными сессиями с 30-секундной дискретностью. Обработка данных выполняется с использованием программного обеспечения Bernese 5.2 [Dach et al., 2015]. При этом используются финальные орбиты спутников, представленные IGS (International GNSS Service), параметры ориентации вращения Земли IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), таблицы фазовых центров антенн, параметров Солнца и Луны и другие материалы, рекомендованные Международной GNSS-службой.

Для выявления косейсмических смещений построен график суточной повторяемости измерений на станции PARM, охватывающий 10 суток до и после Парамуширского землетрясения (рис. 7). В качестве опорных (фиксированных) в обработку включены удаленные станции IGS-сети MAG0 (г. Магадан), PETS (г. Петропавловск-Камчатский) и YSSK (г. Южно-Сахалинск). Априорная точность суточных решений, основанная на точности орбитографии спутников, возможных ошибках ионосферной и тропосферной задержек прохождения сигнала, составляет 4–6 мм для горизонтальных компонент и 12–13 для вертикальной.

Деятельность активного вулкана Эбеко (эксплозивное извержение с 2016 г. [Дегтерев, Чибисова, 2020]), находящегося в 7 км от станции PARM, оказывает влияние на результаты GNSS-измерений. Поэтому

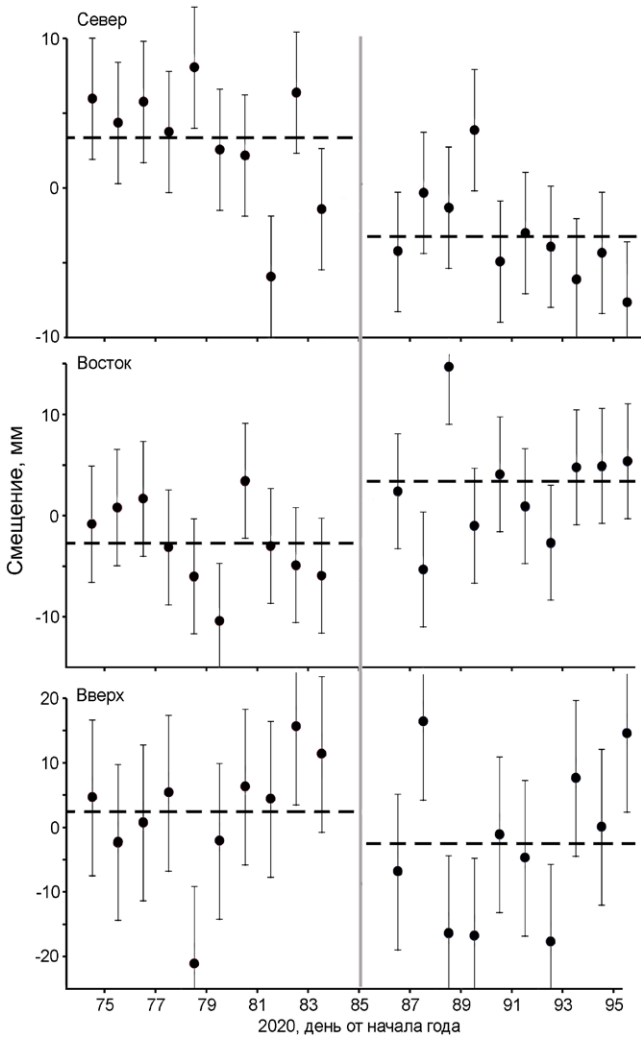


Рис. 7. Временные серии координат GNSS-станции PARM (г. Северо-Курильск) с 14 марта по 4 апреля 2020 г. по Гринвичскому времени. Априорная оценка точности суточных решений показана вертикальными линиями вверх–вниз от каждой точки. Серой вертикальной линией обозначена дата главного толчка Парамуширского землетрясения.

косейсмическое смещение на станции было определено как разность средних за 10 суток координат до и после землетрясения. По компонентам оно составило: 6.4 мм на юг, 5.6 мм на восток и 4.8 мм опускание.

Оценки косеймических смещений на основе дислокационных моделей [Окада, 1985] с параметрами механизмов очага по данным различных сейсмологических центров (таблица), показывают, что однозначно выделить рабочую плоскость сейсморазрыва Парамуширского землетрясения не представляется возможным. Модели для обеих нодальных плоскостей северо-западного и юго-восточного падения очага дают схожие величины косейсмических смещений на станции PARM.

Заключение

Парамуширское землетрясение 25.03.2020 г. M_W = 7.5, произошедшее в погружающейся Тихоокеанской литосферной плите на глубине около 55 км, является весьма редким внешним сейсмическим событием. Несмотря на довольно высокий уровень сейсмической активности северного фланга Курильской зоны субдукции, землетрясение является сильнейшим с 1900 г. сейсмическим событием для внешней относительно желоба области протяженностью около 800 км. Оно оказалось самым сильным и для прилегающего к эпицентру трехсоткилометрового участка зоны субдукции. Единственное сопоставимое по силе сейсмическое событие M = 7.3 произошло в этом районе в 1916 г. севернее эпицентральной области настоящего землетрясения.

Очаговая зона землетрясения 95 × 50 км вытянута вдоль внешнего склона глубоководного желоба. Эпицентр главного толчка приурочен к южному краю облака афтершоков, которые локализованы в интервале глубин 15–53 км. Анализ развития сейсмического процесса выявил дефицит сильных событий в афтершоковой последовательности (кумулятивная энергия афтершоков в ~$2 \cdot 10^3$ раза меньше энергии главного события) и быстрое его спадание с переходом в фоновый режим на 20-е сутки после главного толчка.

Решения механизма очага землетрясения по данным различных сейсмологических центров схожи. В очаге реализовались напряжения субгоризонтального сжатия, ориентированные по направлению СЗ–ЮВ. Тип подвижки – взброс по обеим возможным плоскостям сейсморазрыва с их простиранием вкрест тектонических структур Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны. Анализ пространственного распределения афтершоков и косейсмических смещений не позволил однозначно выделить рабочую плоскость подвижки в очаге.

Внешняя внутриплитовая сейсмичность, имея пространственно-временную связь с крупными межплитовыми землетрясениями, может являться дополнительным индикатором напряженного состояния области контакта литосферных плит. Анализ современной геодинамической обстановки северного участка Курильской зоны субдукции и оценка влияния на нее Парамуширского землетрясения M_W = 7.5 является задачей дальнейших исследований.

Список литературы

1. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. **2020.** Активизация вулкана Эбеко в мае–июле 2020 г. (о. Парамушир, Северные Курилы). *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 500–505. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.500-505

2. *Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.)*. URL: http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php (accessed 16.01.2021).

3. *Каталог механизмов очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов*. URL: http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/mechanism.php (accessed 16.01.2021).

4. Королев Ю.П., Королев П.Ю. **2020.** Моделирование процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами 25.03.2020. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 259–265. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.259-265

5. Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. **2013.** Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг. *Вулканология и сейсмология*, 1: 41–64.

6. Сафонов Д.А., Коновалов А.В., Злобин Т.К. **2015.** Урупская серия землетрясений 2012–2013 гг. *Вулканология и сейсмология,* 6: 60–70. https://doi.org/10.7868/S0203030615060073

7. Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. **2020.** Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2019 году. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 146–159. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.146-159

8. Тараканов Р.З., Андреева М.Ю. **2012.** Роль сейсмофокальной зоны в формировании и развитии структур Курило-Охотского региона. *Тихоокеанская геология*, 31(6): 87–96.

9. Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Золотухин Д.Е., Ивельская Т.Н., Поплавский А.А., Прытков А.С., Спирин А.И. **2008.** Симуширские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 года и 13 января 2007 года. *Тихоокеанская геология*, 27(1): 3–16.

10. Ammon C.J., Kanamori H., Lay T. **2008.** A great earthquake doublet and seismic stress transfer cycle in the central Kuril islands. *Nature*, 451(7178): 561–565. https://doi.org/10.1038/nature06521

11. Bath M. **1965.** Lateral inhomogeneities of the upper mantle. *Tectonophysics*, 2(6): 483−514. https://doi.org/10.1016/0040-1951(65)90003-x

12. Blaser L., Kruger F., Ohmberger M., Scherbaum F. **2010.** Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment. *Bull. of the Seismological Society of America*, 100(6): 2914–2926. http://dx.doi.org/10.1785/0120100111

13. Christensen D.H., Ruff L.J. **1988.** Seismic coupling and outer rise earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 93(B11): 13421–13444. https://doi.org/10.1029/jb093ib11p13421

14. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. (eds) **2015**. *Bernese GNSS Software Version 5.2.* Bern: University of Bern, Bern Open Publ., 862 p. doi:10.7892/boris.72297

15. Okada Y. **1985.** Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. of the Seismological Society of America*, 75(4): 1135–1154.

16. Omori F. **1894.** On the aftershocks of earthquakes. *J. of the College of Science, Imperial University of Tokyo*, 7: 111–200.

17. Shcherbakov R., Turcotte D.L. **2004.** A modified form of bath's law. *Bull. of the Seismological Society of America*, 94(5): 1968–1975. https://doi.org/10.1785/012003162

18. Skarlatoudis A.A., Somerville P.G., Thio H.K. **2016.** Source-scaling relations of interface subduction earthquakes for strong ground motion and tsunami simulation. *Bull. of the Seismological Society of America*, 106(4): 1652–1662. http://dx.doi.org/10.1785/0120150320

19. Steblov G.M., Kogan M.G., Levin B.V., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I. **2008.** Spatially linked asperities of the 2006–2007 great Kuril earthquakes revealed by GPS. *Geophysical Research Letters*, 35(22): L22306. http://dx.doi.org/10.1029/2008GL035572

20. Ye L., Lay T., Kanamori H. **2021.** The 25 March 2020 *Mw*7.5 Paramushir, northern Kuril Islands earthquake and major (Mw ≥ 7.0) near-trench intraplate compressional faulting. *Earth and Planetary Science Letters*, 556(B11): 116728. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020

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

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

УДК 550.34.06

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.113-120.121-127

TRANSLATION

The March 25, 2020 M_W 7.5 Paramushir earthquake

Alexander S. Prytkov, Nikolay F. Vasilenko*

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

Abstract. The strong earthquake with moment magnitude M_W = 7.5 occurred on March 25, 2020, in the North Kurils to the southeast of the Paramushir Island. The hypocenter of the earthquake was located under the oceanic rise of deep-sea trench in the subducting Pacific lithospheric plate. This earthquake has been the strongest seismic event since 1900 for an area about 800 km long of the outer rise of the trench. It also was the strongest earthquake for the 300-kilometer long area of the Kuril-Kamchatka subduction zone adjacent to the epicenter. The article summarizes the data on the Paramushir earthquake. Tectonic position of the earthquake, source parameters, features of the aftershock process development, as well as coseismic displacement of the nearest continuous GNSS station are considered. The performed analysis did not allow us to clearly determine the rupture plane in the source. Nevertheless, the study of the features of the outer-rise earthquake is a matter of scientific interest, since the stress state of the bending area of the subducting Pacific lithospheric plate reflects the interplate interaction in the subduction zone.

Keywords: North Kurils, Paramushir earthquake, aftershocks, focal mechanism, coseismic displacements

For citation: Prytkov A.S., Vasilenko N.F. The March 25, 2020 M_W 7.5 Paramushir earthquake. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 113–127. (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.113-120.121-127

Acknowledgements
The authors are grateful to Dmitry Safonov for the provided materials of determining of the Paramushir earthquake moment tensor.

Introduction

On March 25, 2020, at 02:49 GMT in the north of the Kuril island arc, about 200 km southeast of the Paramushir Island an earthquake with a moment magnitude M_W = 7.5 occurred (Fig. 1). According to the data of the Sakhalin and Kamchatka branches of the Federal Research Center "Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences" (SB FRC GS RAS and KB FRC GS RAS), its macroseismic effect in Severo-Kurilsk reached 5–6 points on the MSK-64 scale. In the settlements of the Kamchatka Peninsula closest to the epicenter, tremors were felt with an intensity of 4–5 points. The earthquake caused a tsunami, the visually determined wave height of which on the Paramushir Island coast was about 0.5 m [Korolev, Korolev, 2020]. In accordance with the geographic location of the source, this seismic event is called the Paramushir earthquake in this work. The used below term "outer" refers to the outer rise of the Pacific Ocean Trench.

The March 25, 2020 Paramushir earthquake occurred in the subducting Pacific lithospheric plate. It refers to strong and rare outer seismic events in the Kuril-Kamchatka subduction zone. According to the USGS data, this earthquake is the strongest since 1900 on the adjacent outer rise of a deep-sea trench about 800 km long, and also the strongest for the 300-kilometer area of the Kuril arc.

The analysis of outer seismicity is of scientific interest, since the stress state of the bending area of the subducting Pacific lithospheric plate reflects interplate interaction in the subduction zone [Christensen et al., 1988]. For this purpose, the work generalizes and analyzes data on the M_W 7.5 outer-rise Paramushir earthquake.

Tectonic position and source parameters of the earthquake

The interaction of the Pacific and North American lithospheric plates is reflected in the features of the spatial distribution of earthquake sources (Fig. 1). The epicenters of most seismic events, including the strongest ones with M > 8, are located between the island arc and the axis of the deep-sea

[1] FRC GS RAS – URL: http://www.ceme.gsras.ru/new/struct (accessed 16.01.2021).
[2] USGS – The United States Geological Survey. URL: https://earthquake.usgs.gov/ (accessed 15.01.2021).

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. Mw = 7.5. *Translation by G.S. Kachesova.*

trench and belong to the region of interplate contact of lithospheric plates (type A). The stresses in the sources of such earthquakes are principally oriented in the horizontal direction perpendicular to the island arc and are classified as overthrust and thrust faults according to the type of seismic dislocations.

The intraplate seismicity of the subduction zone (type B) clearly marks a seismic focal zone about 70 km thick, which falls under the islands [Tarakanov, Andreeva, 2012]. By the type of seismic dislocations, seismic events are normal faults or thrust faults depending on if they occur in the lower part of the subducting Pacific plate under tension, or in the upper, compressed part [Safonov et al., 2015].

Seismic events occurring in the zone external to the trench (type C) are spatially located in the oceanic rise of the deep-sea trench and eastward of it. Strong (including tsunamigenic) intraplate earthquakes with the seismic dislocations of normal fault type are possible here [Tikhonov et al., 2008]. The likely cause of such earthquakes is the bending of the upper elastic part of the subducting plate [Safonov et al., 2015]. However, there are frequent cases of occurrence in this area of earthquakes with thrust faults in the sources, which reflects the state of compression of the fore-trench area.

Since 1964, only two outer-rise earthquakes with magnitudes $M_W > 7.0$ have been recorded in the Kuril-Kamchatka subduction zone (Fig. 1). The strongest of them was the second seismic event on January 13, 2007, with $M_W = 8.1$ of Simushir earthquake doublet of 2006–2007, which occurred at a depth of 10 km under extension settings.

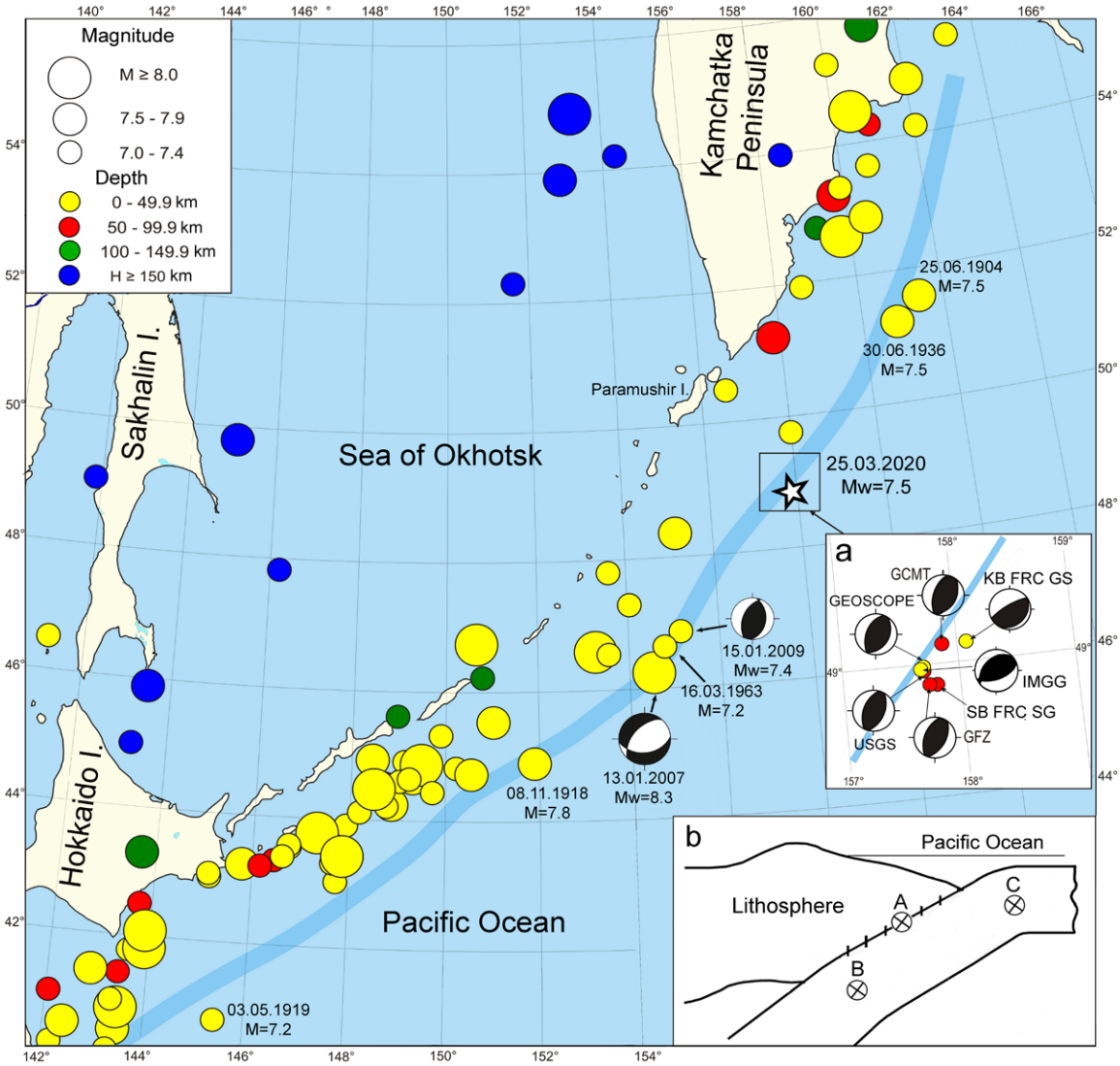


Figure 1. Map of earthquake epicenters of the Kuril-Kamchatka region with M ≥ 7.0 for the period of 1900–2020 according to USGS (https://earthquake.usgs.gov/). (a) – the epicenters and focal mechanisms of the Paramushir earthquake according to the seismological agencies (Table); (b) – schematic model of the subduction zone. A, B, C – types of seismic events in the subduction zone.

In terms of seismic dislocations, it qualifies as a normal fault resulting from the stress relaxation process in the subduction zone after the November 15, 2006 M_W 8.3 earthquake [Steblov et al., 2008; Ammon et al., 2008]. In 2009, an earthquake with M_W = 7.4 occurred northeast of the Simushir earthquakes at a depth of 45 km under compressional settings. The analysis carried out in [Ye et al., 2021] showed this event not to be associated with the processes of contact of lithospheric plates in the subduction zone and be an aftershock of the January 13, 2007 M_W 8.1 Simushir earthquake, although it occurred in a compressional settings and had a thrust movement in the source.

The Paramushir earthquake was promptly processed by the regional centers and world seismological agencies (Table; Fig. 1). Discrepancies in the setting of epicenter coordinates using the data of seismological agencies working with various instrumental observation networks and information processing techniques are insignificant. From the position of the earthquake hypocenter, we can confidently conclude that this event took place in the outer zone at a depth of ~ 55 km under the oceanic rise in the subducting Pacific plate.

Earthquake focal mechanism solutions are quite similar (table). Only the regional determinations by the KB FRC GS RAS [Catalogue of earthquake...] and the IMGG FEB RAS differ somewhat from the results of international agencies, which can arise from different number of seismic stations used for calculations and their geographic location. The compression axis is subhorizontal and oriented in the NW–SE direction, and the extension one is subvertical, for all the solutions obtained. The type of displacement along the both planes of the seismic rupture is a pure thrust fault (or a thrust fault with an insignificant shift component). The strike of the nodal planes of the source practically coincides with the strike of the deep-sea trench.

Aftershock process

The aftershock process in the source zone of the Paramushir earthquake is analyzed according to the data of the KB FRC GS RAS [Earthquakes catalogue...]. After the main shock with M_L = 7.7 the regional stations recorded more than 120 seismic events during the first day; for March – December 2020 about 400 aftershocks were recorded, 3 of which had a magnitude $M_L \geq 5.5$ (Fig. 2).

The aftershocks spatial distribution made it possible to delineate the epicentral area of the earthquake. It is about 50 km wide and extends in the NE–SW direction along the deep-sea trench for 95 km (Fig. 2). The linear dimensions of the source zone satisfy empirical estimators (85 × 41 km) for intraplate M_W = 7.5 earthquakes ($M_0 \sim 2 \cdot 10^{20}$ Nm) [Blaser et al., 2010; Skarlatoudis et al., 2016]. The main shock epicenter is confined to the southern edge of the aftershock

Table. **The main parameters of the Paramushir earthquake according to the data of regional centers and international seismological agencies**

Source	Coordinates of the epicenter		Depth, km	Magnitude	Nodal planes		
	° N	° E			Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)
IMGG FEB RAS	48.99	157.69	(32)	M_W = 7.1	223/69	37/56	69/105
SB FRC GS RAS	48.88	157.80	72	M_{LH} = 7.5			
KB FRC GS RAS	49.11	158.08	48	M_L = 7.7 M_C = 7.5	240/39	72/19	97/70
USGS	48.964	157.696	57.8 (61)	M_W = 7.5 mb = 7.1	201/23	47/43	88/92
GCMT	49.11	157.87	(52.6)	M_S = 7.5 M_W = 7.5	194/32	48/43	78/103
GFZ	48.89	157.74	51 (43)	M_W = 7.4	199/28	46/43	84/96
GEOSCOPE Observatory	48.986	157.693	(45)	M_W = 7.5	203/30	51/39	86/95

Note. The depth of model centroid is given in parenthesis. M_W – moment magnitude, M_{LH} – local surface wave magnitude, M_L – local magnitude obtained through recalculating from the energy class using the nomogram by S.A. Fedotov, M_C – spectral coda magnitude, M_S – surface wave magnitude, mb – body wave magnitude. IMGG FEB RAS – The Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; SB FRC UGS RAS – http://www.ceme.gsras.ru/new/struct; KB FRC GS RAS – http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php; USGS – https://earthquake.usgs.gov/; GCMT – Global Centroid Moment Tensor, https://www.globalcmt.org; GFZ – Global Centroid Moment Tensor, https://www.globalcmt.org; Geoscope Observatory – French Global Network of broad band seismic, http://geoscope.ipgp.fr.

cloud, which are localized in the depth interval of 15–53 km. The aftershocks spatial distribution over the depth (cross section across the strike of the deep-sea trench along the AA' line) does not give a visual representation of the possible working plane of the seismic rupture dip.

The first strong aftershock with M_L = 5.7 was recorded on March 25 at a depth of ~50 km. An aftershock with M_L = 5.5 (M_W = 5.1) occurred on April 7, at the same depth, and a seismic event with M_L = 5.9 (M_W = 5.1) occurred on June 14, at a depth of ~30 km. The difference between the magnitudes of the main event and the strongest aftershock for M_L is 1.8, and for M_W – 2.4. According to Bath's empirical law, this difference should be within the range of 0.6–1.7 [Bath, 1965; Shcherbakov, Turcotte, 2004]. Consequently, the expected magnitude M_L of the strongest aftershock should be 6.0–7.1, and M_W – 5.8–6.9. This feature indicates the presence of strong events deficiency in the aftershock process. The time dependence and graph of the aftershock cumulative energy after the main shock until the end of 2020 are shown in Fig. 3. The low level of the aftershock cumulative energy ΣE ($3.0 \cdot 10^{13}$ J), the value of which is $2.1 \cdot 10^3$ times less than the energy of the main event ($6.3 \cdot 10^{16}$ J), also indicates a seismicity deficiency.

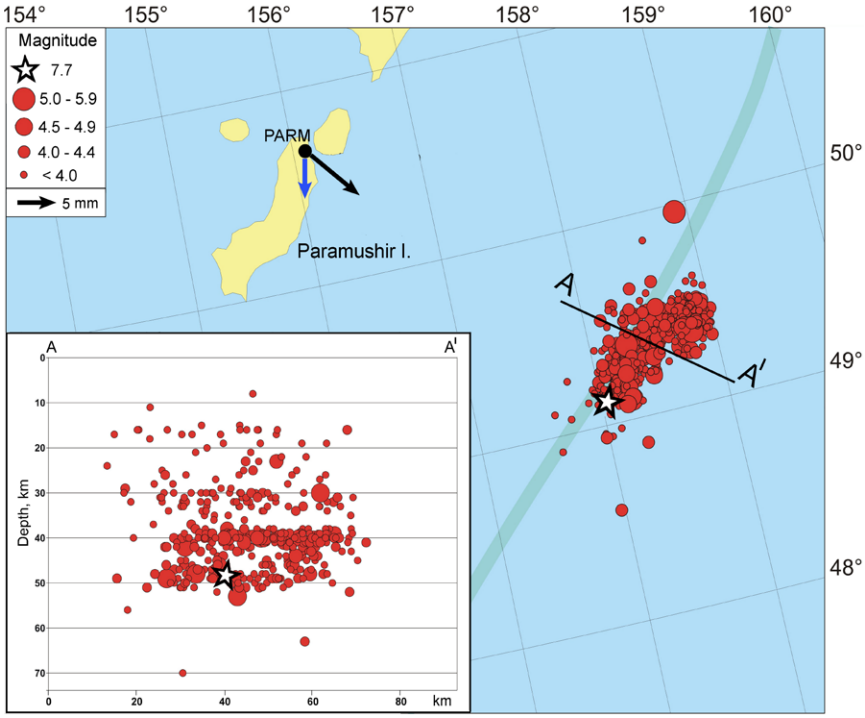


Figure 2. Map of the Paramushir earthquake aftershocks by KB FRC GS RAS [Earthquakes Catalogue...]. The horizontal coseismic displacement of the GNSS station PARM is shown with a black arrow, the vertical displacement is shown with a blue one. The inset shows a cross section of the aftershock area along the line AA'. The main shock is marked with an asterisk.

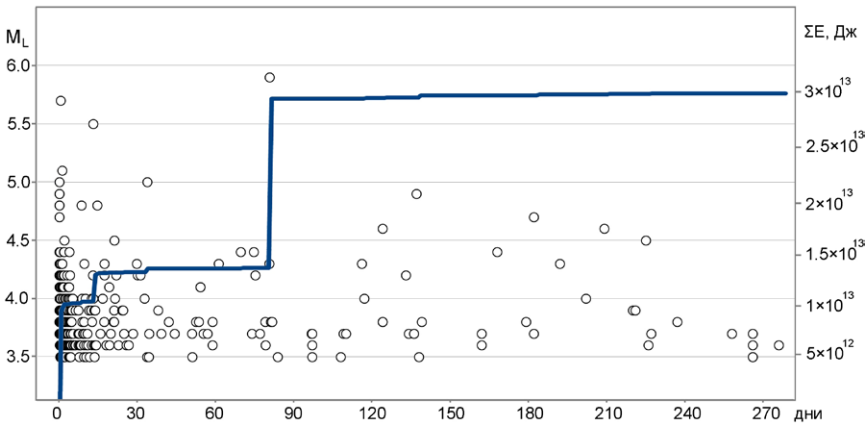


Figure 3. Time dependence and the graph of the aftershock cumulative energy of the Paramushir earthquake for the period of 25.03.2020 – 31.12.2020.

The aftershocks recurrence graph of the Paramushir earthquake is shown in Fig. 4. The representativeness degree of the catalogue by magnitude M_L is ~ 3.6. The linear character of the graph remains for the range of magnitudes 3.6–4.4. Its slope b = 1.08 ± 0.10 (correlation coefficient R = 0.97 ± 0.09) corresponds to the average for the Kuril-Okhotsk region, the ten-year value of which b = 1.0 [Safonov et al., 2020], and is also close to the long-term average for the "Pacific Ocean" seismicity zone of the Kamchatka region and adjacent regions [Levina et al., 2013]. The aftershocks number within the range of 4.5–4.7 is much lower than one would expect based on the distribution of weaker earthquakes.

The decrease in the number of earthquakes with time after the main shock gives an idea of the nature of the seismic process development. According to the Omori empirical law [Omori, 1894], the aftershock process (Fig. 5) developed during the first two weeks in accordance with the index p = –1.28 ± 0.18, which corresponds to the worldwide average value of seismic activity decay with time in the

earthquakes' sources. A slight activation on the 4–5th days brought to a decrease in seismic activity on the 7th day. The seismicity decay is displayed on the cumulative graph of the earthquakes number (Fig. 6), where the aftershock sequence decreasing in time according to the hyperbolic law passes into a new mode. On the 20th day (April 15, 2020) after the main shock, this mode came close to linear one, which may indicate the transition of the seismic process to the background stage. It is noteworthy that the aftershocks of April 7, 2020, M_L = 5.5 and June 14, 2020, M_L = 5.9 did not cause any additional activation of the process decaying with time.

Coseismic displacement of the PARM GNSS-station

Coseismic displacements of the earth's surface serve as a basis for constructing dislocation models, which make it possible to uniquely determine the working plane of a seismic rupture as a result of a strong earthquake. The nearest regional GNSS (Global Navigation Satellite System) station of continuous recording PARM is located in the Severo-Kurilsk city and is 220 km northeast of the Paramushir earthquake epicenter. Data record at the station is made by 24-hour daily sessions with 30-second discreteness. Data processing is performed using the Bernese 5.2 software [Dach et al., 2015]. In this case, the final satellite orbits provided by the IGS (International GNSS Service), the parameters of the orientation of the Earth rotation IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), tables of the antenna phase centers, the parameters of the Sun and the Moon, and other materials recommended by the International GNSS Service are used.

To identify coseismic displacements, a graph of daily repeatability of measurements at the PARM station, covering 10 days before and after the Paramushir earthquake, was built (Fig. 7). Remote stations of the IGS network MAG0 (Magadan), PETS (Petropavlovsk-Kamchatsky) and YSSK (Yuzhno-Sakhalinsk) were included in the processing as reference (fixed) stations. The a priori accuracy of daily solutions

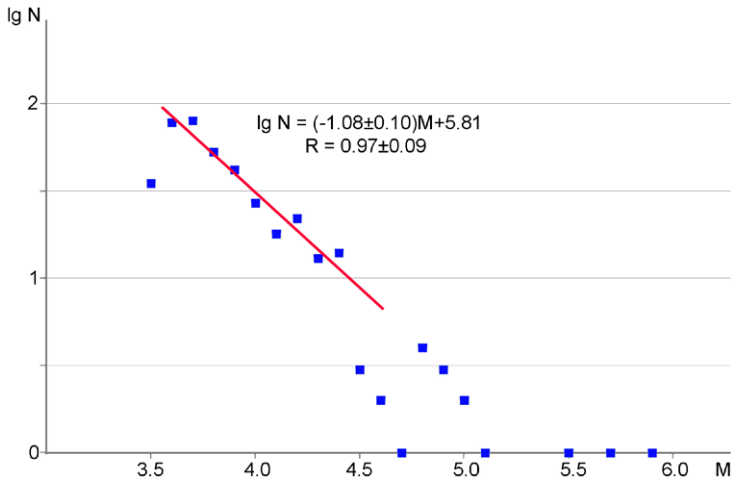


Figure 4. The aftershocks recurrence graph of the Paramushir earthquake. Origin time of the main shock is taken as the reference point. The approximation of the linear part of the graph is represented with a solid line.

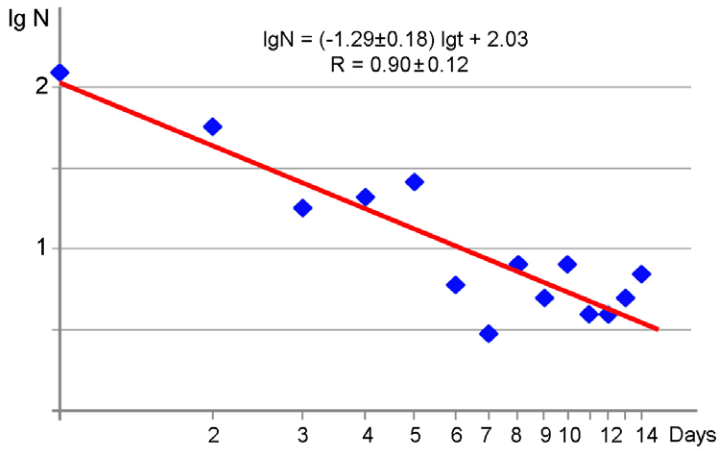


Figure 5. Graph of the aftershock process decay within two weeks after the Paramushir earthquake.

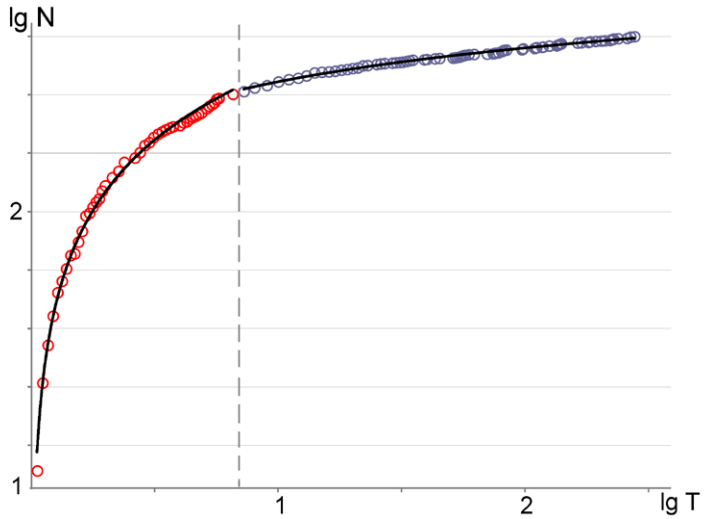


Figure 6. Cumulative graph of the aftershocks number of the Paramushir earthquake. The vertical dashed line shows the time of the change in aftershock mode.

based on the accuracy of satellite orbitography, possible errors in ionospheric and tropospheric signal propagation delays is 4–6 mm for horizontal components and 12–13 mm for vertical one.

Activity of the Ebeko active volcano (explosive eruption since 2016 [Degterev, Chibisova, 2020]), located 7 km from the PARM station, affects the results of GNSS measurements. Therefore, the coseismic displacement at the station was determined as the difference between the average coordinates for 10 days before and after the earthquake. By the components it was: 6.4 mm to the south, 5.6 mm to the east, and 4.8 mm descending.

Estimates of coseimic displacements based on dislocation models [Okada, 1985] with the parameters of the focal mechanisms according to the data of various seismological centers (table) show that it is not possible to uniquely identify the working plane of the seismic rupture of the Paramushir earthquake. The models for both nodal planes of the northwest and southeast dip of the source provide similar values of coseismic displacements at the PARM station.

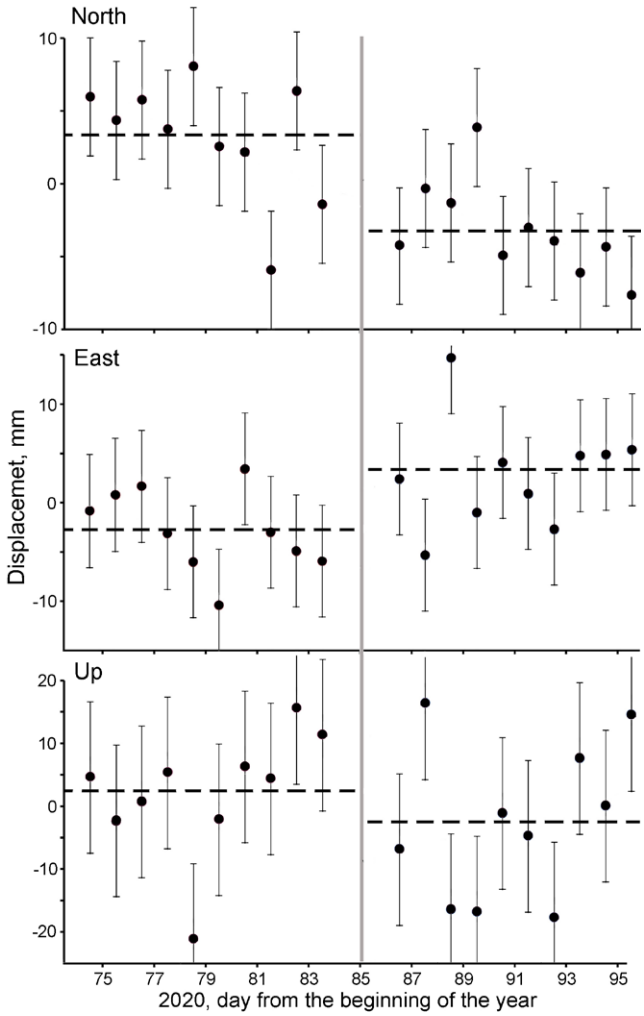


Figure 7. Coordinate time series of the PARM GNSS-station (Severo-Kurilsk city) from March 14 to April 4, 2020, GMT. A priori estimation of the daily solutions accuracy is shown with vertical lines up and down from each point. The gray vertical line indicates the date of the main shock of the Paramushir earthquake.

Conclusion

The March 25, 2020 M_W 7.5 Paramushir earthquake, which occurred in the subducting Pacific lithospheric plate at a depth of about 55 km, is a very rare outer seismic event. Despite the rather high level of seismic activity in the northern flank of the Kuril subduction zone, this earthquake is the strongest seismic event since 1900 for an area about 800 km long external to the trench. It appeared to be the strongest for the 300-kilometer section of the subduction zone adjacent to the epicenter. The only seismic event of comparable strength with M = 7.3 have occurred in this area in 1916 to the north of the epicentral area of the present earthquake.

The focal zone of the 95 × 50 km earthquake is extended along the outer rise of the deep-sea trench. The main shock epicenter is confined to the southern edge of the aftershock cloud, which are localized in the depth interval of 15–53 km. Analysis of the seismic process development revealed a deficit of strong events in the aftershock sequence (the cumulative energy of aftershocks is $\sim 2 \cdot 10^3$ times less than the energy of the main event) and its rapid decay with a transition to the background mode on the 20th day after the main shock.

Earthquake focal mechanism solutions according to the data of various seismological centers are quite similar. Subhorizontal compression stresses, oriented in the NW–SE direction, were realized in the source. Displacement type is a thrust fault along both possible planes of seismic rupture with their strike across the tectonic structures of the Kuril-Kamchatka seismic focal zone. Analysis of the spatial distribution of aftershocks and coseismic displacements did not make it possible to uniquely identify the working plane of the displacement in the source.

Outer intraplate seismicity, having a spatiotemporal connection with large interplate earthquakes, can be an additional indicator of the stress state of the contact area of lithospheric plates. The task of further research is the analysis of the current geodynamic setting of the northern part of the Kuril subduction zone and impact assessment of the M_W 7.5 Paramushir earthquake on it.

References

1. Ammon C.J., Kanamori H., Lay T. **2008.** A great earthquake doublet and seismic stress transfer cycle in the central Kuril Islands. *Nature*, 451(7178): 561–565. https://doi.org/10.1038/nature06521

2. Bath M. **1965.** Lateral inhomogeneities of the upper mantle. *Tectonophysics*, 2(6): 483−514. https://doi.org/10.1016/0040-1951(65)90003-x

3. Blaser L., Kruger F., Ohmberger M., Scherbaum F. **2010.** Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment. *Bull. of the Seismological Society of America*, 100(6): 2914–2926. http://dx.doi.org/10.1785/0120100111

4. *Catalogue of earthquake focal mechanisms for Kamchatka and the Commander Islands*. URL: http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/mechanism.php (accessed 16.01.2021).

5. Christensen D.H., Ruff L.J. **1988.** Seismic coupling and outer rise earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 93(B11): 13421–13444. https://doi.org/10.1029/jb093ib11p13421

6. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. (eds) **2015**. *Bernese GNSS Software Version 5.2.* Bern: University of Bern, Bern Open Publ., 862 p. doi:10.7892/boris.72297

7. Degterev A.V., Chibisova M.V. **2020.** Activation of the Ebeko volcano in May–July, 2020 (Paramushir Island, Northern Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 500–505. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.500-505

8. *Earthquakes Catalogue for Kamchatka and the Commander Islands (1962–present).* URL: http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php (accessed 16.01.2021).

9. Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. **2020.** Simulation of the process of short-term forecasting of the 25.03.2020 Onekotan tsunami. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 259–265. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.259-265

10. Levina V.I., Lander A.V., Mityushkina S.V., Chebrova A.Y. **2013.** The seismicity of the Kamchatka region: 1962–2011. *J. of Volcanology and Seismology*, 7(1): 37–57. https://doi.org/10.1134/S0742046313010053

11. Safonov D.A., Konovalov A.V., Zlobin T.K. **2015.** The Urup Earthquake sequence of 2012–2013. *J. of Volcanology and Seismology*, 9(6): 402–411. https://doi.org/10.1134/S074204631506007X

12. Safonov D.A., Kostylev D.V., Fokina T.A., Kovalenko N.S. **2020.** Seismicity of the South Far East of Russia in 2019. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 146–159. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.146-159

13. Tarakanov R.Z., Andreeva M.Yu. **2012.** Role of seismic focal zone in the formation and development of the Kuril – the Sea of Okhotsk region structures. *Russian J. of Pacific Geology*, 31(6): 87–96. (In Russ.).

14. Tikhonov I.N., Vasilenko N.F., Zolotukhin D.E., Ivelskaya T.N., Poplavskii A.A., Prytkov A.S., Spirin A.I. **2008.** Simushir Earthquakes and Tsunami of November 15, 2006, and January 13, 2007. *Russian J. of Pacific Geology*, (2)1: 1–14.

15. Okada Y. **1985.** Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. of the Seismological Society of America*, 75(4): 1135–1154.

16. Omori F. **1894.** On the aftershocks of earthquakes. *J. of the College of Science, Imperial University of Tokyo*, 7: 111–200.

17. Shcherbakov R., Turcotte D.L. **2004.** A modified form of Bath's law. *Bull. of the Seismological Society of America*, 94(5): 1968–1975. https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/94/5/1968/121045/A-Modified-Form-of-Ba-th-s-Law?redirectedFrom=fulltext

18. Skarlatoudis A.A., Somerville P.G., Thio H.K. **2016.** Source-scaling relations of interface subduction earthquakes for strong ground motion and tsunami simulation. *Bull. of the Seismological Society of America*, 106(4): 1652–1662. http://dx.doi.org/10.1785/0120150320

19. Steblov G.M., Kogan M.G., Levin B.V., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I. **2008.** Spatially linked asperities of the 2006–2007 great Kuril earthquakes revealed by GPS. *Geophysical Research Letters*, 35(22): L22306. http://dx.doi.org/10.1029/2008GL035572

20. Ye L., Lay T., Kanamori H. **2021.**The 25 March 2020 Mw7.5 Paramushir, northern Kuril Islands earthquake and major (Mw ≥ 7.0) near-trench intraplate compressional faulting. *Earth and Planetary Science Letters*, 556(B11): 116728. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020

Об авторах

ПРЫТКОВ Александр Сергеевич (https://orcid.org/0000-0003-4488-1682), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, a.prytkov@imgg.ru

ВАСИЛЕНКО Николай Федорович (https://orcid.org/0000-0003-1591-9071), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, n.vasilenko@imgg.ru

About the Authors

PRYTKOV Alexander S. (https://orcid.org/0000-0003-4488-1682), Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, a.prytkov@imgg.ru

VASILENKO Nikolay F. (https://orcid.org/0000-0003-1591-9071), Cand. of Engineering, Leading Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, n.vasilenko@imgg.ru

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

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

ДИСКУССИИ

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.128-132.133-137

О форшоковом каскаде и удивительных прогнозах, в связи со статьей А.И. Малышева и Л.К. Малышевой «Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил»*

© 2021 *М. В. Родкин*[1,2,3]

[1]*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Россия*
[2]*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия*
[3]*Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия*

**E-mail: rodkin@mitp.ru*

Резюме. Не по многим вопросам наблюдается такое различие мнений, как о существовании и характере форшоковой активизации. Диапазон здесь от публичного признания, что описанный ранее эффект форшоковой лавинообразной активизации – не более чем результат (пусть и неосознанной) подгонки данных, до случаев неправдоподобно точных прогнозов времени сильных землетрясений (пусть и ретроспективных). Статья А.И. Малышева и Л.К. Малышевой, публикуемая в настоящем выпуске журнала, дала повод снова вернуться к этим разногласиям – и предложить возможный вариант их объяснения.

Ключевые слова: метод саморазвивающихся процессов, accelerated seismic moment release (AMR), форшоковый каскад, случайная и систематическая компоненты сейсмического режима

On the foreshock cascade and extraordinary predictions, in relevance to the article by A.I. Malyshev and L.K. Malysheva “Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region”

Mikhail V. Rodkin[1,2,3]

[1]*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Russia*
[2]*Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*
[3]*Institute of Oil and Gas Problems, RAS, Russia*

**E-mail: rodkin@mitp.ru*

Abstract. Not so many issues, that have such a divergence of view, as on the existence and nature of foreshock activation. The range here is from public admission, that the previously described effect of foreshock avalanche-like activation is nothing more than the result of (though unconscious) data fitting, to the cases of incredibly accurate predictions of the time of strong earthquakes (though retrospective). The article by A.I. Malyshev and L.K. Malysheva, published in the current issue, gave a reason to return to these disagreements again and to offer a possible explanation for them.

Keywords: method of the self-developing processes, accelerated seismic moment release (AMR), foreshock cascade, random and systematic components of a seismic regime

Для цитирования: Родкин М.В. О форшоковом каскаде и удивительных прогнозах, в связи со статьей А.И. Малышева и Л.К. Малышевой «Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил». *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 2, с. 128–137. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.128-132.133-137

For citation: Rodkin M.V. On the foreshock cascade and extraordinary predictions, in relevance to the article by A.I. Malyshev and L.K. Malysheva “Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region”. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, vol. 5, no. 2, pp. 128–137. (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.128-132.133-137

* См. статью в настоящем выпуске журнала, с. 84–112. Указанная статья и настоящее сообщение публикуются на русском и английском языках.

Благодарности и финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (тема АААА-А19-119011490129-0), Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (тема АААА-А18-118012290125-2.2) и Института проблем нефти и газа РАН (тема АААА-А19-119013190038-2) при частичной поддержке РФФИ (проект № 19-05-00466).

Автор признателен Л.М. Богомолову за предложение развернуть рецензию на статью в полноценную публикацию, за пожелания дополнительно обсудить ряд важных спорных вопросов и за обсуждения в процессе подготовки публикации.

В довольно далеком уже 2009 году, когда мне довелось быть оппонентом докторской диссертации И.Н. Тихонова, на меня сильное впечатление произвели полученные им ретроспективные прогнозы времени ряда сильных сахалинских землетрясений [Тихонов, 2009, 2019 и др.]. Иван Николаевич для прогноза времени сильных землетрясений использовал метод саморазвивающихся процессов (СРП) А.И. Малышева в его же программной реализации [Малышев, 1991; Малышев, Тихонов, 1991, 2007; Тихонов, 2008; Tikhonov, Rodkin, 2012; и др.]. В СРП-методе развитие форшоковой последовательности описывается процессом с обострением. Задается общее уравнение процесса с обострением. Выбирается параметр (например, сейсмическая энергия) и интервал времени; на основании этих данных рассчитывается момент времени выхода процесса на вертикальную асимптоту. Потрясающе, но время некоторых событий таким образом ретроспективно угадывалось с точностью до нескольких дней или часов или даже нескольких минут**. Заметим, что для таких удивительных прогнозов использовались данные о сейсмическом процессе до самого момента сильного землетрясения; отсюда понятно, что такие прогнозы и не могли быть получены иначе как ретроспективно.

В дальнейшем метод СРП применялся и дорабатывался [Тихонов и др., 2017; Закупин и др., 2019; Малышев, 2020; и др.]. Однако эффективность этого метода остается дискуссионной. В первую очередь нарекания вызывают неустойчивость результатов прогноза и проблема отбраковки ложных прогнозов; ошибки пропуска цели встречаются относительно реже.

Весьма похожим образом, хотя и под другими названиями, развивалась ситуация и на «международной арене». Аналог режима саморазвивающегося лавинообразного СРП-процесса носит в международной терминологии название “accelerated moment release model” (AMR model). Такой режим ускоренного роста величин сейсмического момента наблюдался при ряде землетрясений и тоже породил надежды, что если уточнить методику анализа данных, то удовлетворительно точный прогноз скоро будет получен [Bowman et al., 1998; Jaumé, Sykes, 1999; Bowman, King, 2001; Sammis et al., 2004; и др.]. Основное различие подхода англоязычных авторов и подхода на основе СРП-метода в том, что при обсуждении AMR-эффекта не ставится задача определить момент выхода процесса на вертикальную асимптоту, и потому прогноз времени события оказывается менее определенным и не вызывает такого смешанного с восхищением сильного недоумения, как отдельные результаты, полученные И.Н. Тихоновым. При этом развитие AMR-режима находит естественную интерпретацию как в рамках представлений об аналогии сильных землетрясений с критическими явлениями, так и в плане эффекта роста тектонической нагрузки, собственно и приводящей к землетрясениям [Bak, 1996; Bowman et al., 1998; Bowman, King, 2001].

Развитие AMR-модели встретило, однако, и серьезные возражения. С самого начала было понятно (как и в случае с моделью СРП-процесса), что выделение AMR-аномалии и характер аномалии существенным образом зависят от выбора интервала времени для анализа. Неясно при этом также, что, собственно, нарастает – растет ли число событий, или растет средняя величина сейсмических событий [Vere-Jones, 2001]. При многих землетрясениях AMR-аномалия не наблюдалась, а в других случаях наблюдалась только при специальном выборе интервала времени для расчета. На волне такой критики один из пропагандистов этого подхода D. Bowman, выступая на конференции

** Это казалось совершенно неправдоподобным, но автор на мое недоумение только разводил руками – ну я же не виноват, что так получается, не специально же мне ухудшать и фальсифицировать полученные результаты? При этом Иван Николаевич сам посмеивался над такой точностью и не забывал отметить, что в большинстве случаев такого прогноза не получается. А ведь способность посмеяться над собственным прогнозом среди предсказателей землетрясений – явление не частое, и оно само по себе уже рождает доверие. Защита прошла вполне успешно.

в 2007 г., признал, что представленный ранее эффект AMR [Bowman et al., 1998] – скорее всего не более чем результат подгонки данных, пусть даже и не осознанной. В этом же ключе в работе [Hardebeck et al., 2008] делается вывод, что развитие аномалии AMR-типа трудно формализуемо, статистически незначимо и потому не может использоваться в качестве надежного прогнозного признака.

Заметим, что критика реальности существования AMR-аномалии развивалась в русле более общего критического направления исследований. Аргументированно ставилась под сомнение сама принципиальная возможность прогноза землетрясений [Geller et al., 1997]. Одновременно с возможностью прогноза были поставлены под сомнение и такие, ранее считавшиеся надежно установленными, законы и характерные особенности сейсмического режима, как существование форшокового каскада активизации, выполнения закона Омори, существование характеристических землетрясений, сейсмического цикла и сейсмических брешей [Ромашкова, Кособоков, 2001; Hardebeck et al., 2008; Kagan et al., 2012]. В перечисленных работах все эти явления не нашли однозначного статистического подтверждения и потому были поставлены под сомнение. Достаточно быстро сомнения были сняты разве только с выполнимости закона Омори, но и он трактуется не более как статистическая тенденция, с указаниями на очень сильную случайную компоненту в сейсмическом режиме, возможность в значительной степени случайного возникновения сильных афтершоков и на развитие вторичных каскадов афтершоков.

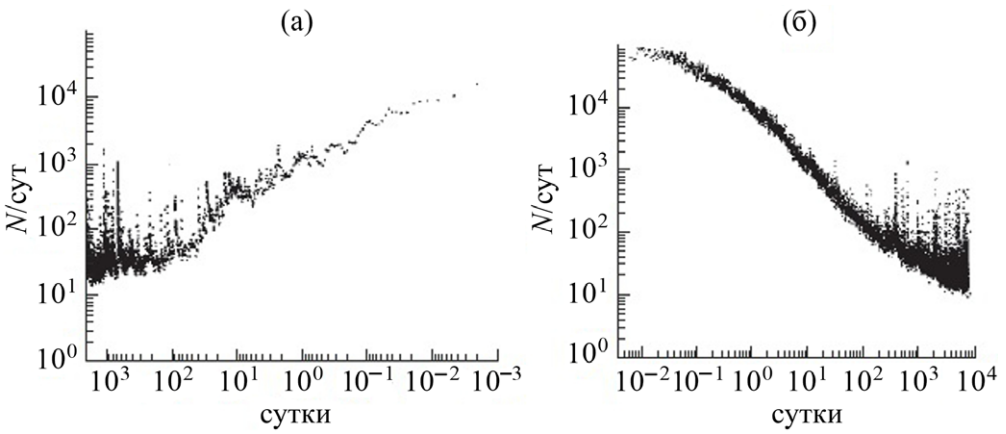
Подчеркнем, что такая же ситуация имеет место и в случае с другими поставленными под сомнение закономерностями сейсмического процесса. Все они маскируются случайной компонентой сейсмического процесса и могут только более или менее определенно угадываться на фоне этой доминирующей случайной компоненты.

Известным способом выделения систематической компоненты на фоне сильного случайного процесса является статистический метод суммирования многих примеров, в каждом из которых общая систематическая компонента может быть почти незаметной. Применительно к данному случаю такой подход был реализован в методе построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) [Родкин, 2008; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016; Родкин, 2020]. При построении ООСЗ отбираются события, попавшие в окрестность одного из большого числа (несколько сотен, до 1000) сильнейших землетрясений данного каталога. Под окрестностью понимаются события, происшедшие от очага данного главного сильного события на расстоянии не более n размеров очага главного события. Число n обычно принимается в интервале 3–6. Для расчета размера очага R (в километрах) в зависимости от магнитуды используется одна из формул, приводимых в работах [Соболев, 1993; Wells, Coppersmith, 1994]; разные формулы дают качественно аналогичные результаты. Опыт построения ООСЗ показывает, что при использовании для построения ООСЗ 100 и менее сильнейших событий сохраняются довольно сильные флуктуации и тенденции изменения исследуемых параметров оказываются замаскированными.

Методом ООСЗ были подтверждены представления о развитии степенных фор- и афтершокового каскадов. Также был выявлен ряд аномалий (частично неизвестных ранее) для других параметров сейсмического режима. Здесь нас интересует характер форшоковой аномалии. На рисунке показан пример ООСЗ для фор- и афтершоковых каскадов по данным мирового ISC каталога, $n = 5$, число использованных при построении ООСЗ сильнейших землетрясений $N = 500$, при построении использованы события $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$ км.

Афтершоковый каскад (см. рисунок, б) полностью отвечает обобщенному закону релаксации потока афтершоков Омори–Утсу. Но не менее определенно выглядит и форшоковая аномалия (см. рисунок, а). По характеру нарастания форшокового степенного роста числа событий (а также по аналогичным аномалиям для выделенной сейсмической энергии и величинам сейсмического момента) нетрудно спрогнозировать момент обобщенного сильного землетрясения. Погрешность такой оценки составит не более 10 минут. Такая оценка была бы получена и при применении методики СРП к анализу данных по росту афтершоковой активности в ООСЗ.

Сравнение с результатами, полученными при анализе ООСЗ, позволяет предложить объяснение обсуждавшимся выше противоречивым выводам о характере форшокового процесса, наличии/отсутствии развития СРП-процесса и наличии/отсутствии AMR-эффекта. Представляется возможным заключить, что



Динамика форшокового (а) и афтершокового (б) процесса в ООСЗ, по [Родкин, 2020].

СРП-процесс и его аналог AMR-эффекты имеют место, но в каждом конкретном случае они оказываются сильно замаскированными доминирующей случайной компонентой сейсмического режима, индивидуальной для окрестности и каждого отдельного сильного землетрясения. В связи с этим с полной очевидностью эти эффекты проявляются только в ООСЗ. При анализе каждого отдельного сильного землетрясения они только угадываются, с той или иной степенью неопределенности. Представляется, однако, возможным, что в ряде случаев случайная компонента сейсмического режима не играет решающей роли, и в этом случае режим AMR-аномалии проявляется достаточно определенно, а метод СРП позволяет получить хорошую оценку момента соответствующего сильного события, как это иногда и наблюдалось по результатам расчетов И.Н. Тихонова.

Приведем дополнительные свидетельства в пользу существования AMR-эффекта, весомо подкрепляющие результаты сопоставления с выводами, полученными при построении и анализе ООСЗ. В работе [Wang et al., 2008] приводятся свидетельства наблюдения аналога AMR-процесса в лабораторных исследованиях по акустической эмиссии. А в работе [Cianchini et al., 2020] по результатам анализа статистических данных о режиме сейсмичности в окрестности исследованной совокупности сильных землетрясений и их сравнению с результатами численного моделирования было получено, что наблюденный AMR-процесс в большинстве рассмотренных случаев является реальной особенностью сейсмического режима, а не случайной его флуктуацией.

Заключаем, что лавинообразный СРП-процесс и AMR-эффект, по-видимому, являются реальной характерной особенностью форшокового процесса и, соответственно, могут быть использованы в целях прогноза землетрясений. Проблема при этом состоит в выделении информативной систематической компоненты на фоне сильного и, по-видимому, случайного шума. В этом контексте предложенная в указанной работе А.И. Малышева и Л.К. Малышевой идея ориентироваться при применении метода СРП на подобие со случаями развития ранее наблюдавшихся форшоковых последовательностей представляется довольно спорной; впрочем, реальную эффективность того или иного алгоритма прогноза землетрясений может показать только практика его использования в реальном времени.

Существование в ООСЗ целого комплекса явственных предвестниковых аномалий вполне очевидно. Из существования этих вполне явственных аномалий следует принципиальная возможность прогноза, в частности возможность достаточно точного «прогноза» времени обобщенного сильного землетрясения. Неясно, однако, каковы перспективы перенесения этого результата на случай отдельного сильного землетрясения. Следует ли ожидать, что увеличение объема доступной прогнозисту информации, скажем, на 2 порядка и немногим более, как при построении ООСЗ, обеспечит возможность аналогичного достаточно точного прогноза уже не обобщенного, а отдельного сильного землетрясения? Или даже такое резкое увеличение объема доступной информации не окажется эффективным, так как в этой информации по-прежнему будут доминировать нетипичные случайные особенности данной конкретной форшоковой последовательности? Ответа на эти вопросы пока нет.

Список литературы

1. Закупин А.С., Богинская Н.В., Андреева М.Ю. **2019.** Методические аспекты исследования сейсмических последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине. *Геосистемы переходных зон*, 3(4): 377–389. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389

2. Малышев А.И. **1991.** Динамика саморазвивающихся процессов. *Вулканология и сейсмология*, 4: 61–72.

3. Малышев А.И. **2020.** Прогнозируемость потока сейсмической энергии Южной Европы и Средиземноморья. *Вулканология и сейсмология*, 1: 33–48.

4. Малышев А.И., Тихонов И.Н. **1991.** Закономерности динамики форшок-афтершоковых последовательностей землетрясений в районе Южных Курильских островов. *Доклады АН СССР*, 319(1): 134–137.

5. Малышев А.И., Тихонов И.Н. **2007.** Нелинейные закономерности развития сейсмического процесса во времени. *Физика Земли*, 6: 37–51.

6. Родкин М.В. **2008.** Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения. *Вулканология и сейсмология*, 6: 66–77.

7. Родкин М.В. **2020.** Типовая фор- и афтершоковая аномалия – эмпирика, интерпретация. *Вулканология и сейсмология*, 1: 64–76.

8. Ромашкова Л.Л., Кособоков В.Г. **2001.** Динамика сейсмической активности до и после сильнейших землетрясений мира, 1985–2000. *Вычислительная сейсмология*, 32: 162–189.

9. Соболев Г.А. **1993.** Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 314 с.

10. Тихонов И.Н. **2008.** Прогноз землетрясений по сейсмологическим данным: методики, достижения, перспективы. В кн.: *Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: сб. материалов II (XX) Сахалинской молодежной науч. школы, Южно-Сахалинск, 4–10 июня 2007 г.* (отв. ред. О.Н. Лихачева). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, с. 7–24.

11. Тихонов И.Н. **2009.** *Методология прогноза сильных землетрясений по потоку сейсмичности на примере северо-западной части Тихоокеанского пояса*: автореф. дис. … д-ра физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск, 41 с.

12. [Тихонов И.Н.] **2019.** *Иван Николаевич Тихонов. Вопросы сейсмологии*: Избр. труды. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 290 с.+1 электрон. опт. диск (DVD). doi:10.30730/978-5-6040621-4-2.2019-2

13. Тихонов И.Н., Михайлов В.И., Малышев А.И. **2017.** Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предваряющих сильные толчки, с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 5–14.

14. Bak P. **1996.** *How Nature Works*. New York: Springer-Verlag, 212 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5426-1

15. Bowman D.D., King G.C.P. **2001.** Accelerating seismicity and stress accumulation before large earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 28(21): 4039–4042. https://doi.org/10.1029/2001GL013022

16. Bowman D.D., Ouillon G., Sammis C.G., Sornette A., Sornette D. **1998.** An observational test of the critical earthquake concept. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10): 24359–24372. https://doi.org/10.1029/98jb00792

17. Cianchini G., De Santis Ang., Giovambattista R.D., Abbattista C., Amoruso L., Campuzano S.A., Carbone M., Cesaroni C., De Santis Anna, Marchetti D. et al. **2020.** Revised accelerated moment release under test: Fourteen worldwide real case studies in 2014–2018 and simulations. *Pure and Applied Geophysics*, 177: 4057–4087. https://doi.org/10.1007/s00024-020-02461-9

18. Geller R.J., Jakson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. **1997.** Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275: 1616–1617. https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616

19. Hardebeck J.L., Felzer K.R., Michael A.J. **2008.** Improved tests reveal that the accelerating moment release hypothesis is statistically insignificant. *J. of Geophysical Research*, 113(B08310). doi:10.1029/2007JB005410

20. Jaumé S., Sykes L. **1999.** Evolving towards a critical point: A review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 155: 279–305. https://doi.org/10.1007/s000240050266

21. Kagan Y.Y., Jackson D.D., Geller R.J. **2012.** Characteristic earthquake model, 1884–2011, R.I.P. *Seismological Research Letters*, 83(6): 951–953. https://doi.org/10.1785/0220120107

22. Rodkin M.V. **2012.** Patterns of seismicity found in the generalized vicinity of a strong earthquake: Agreement with common scenarios of instability development. In: *Extreme events and natural hazards: The complexity perspective*: Geophysical Monograph Series, 196. doi:10.1029/2011GM001060

23. Rodkin M.V., Tikhonov I.N. **2016.** The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake. *Physics and Chemistry of the Earth*, 95: 73–84. https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.04.001

24. Sammis C., Bowman D., King G. **2004.** Anomalous seismicity and accelerating moment release preceding the 2001 and 2002 earthquakes in Northern Baja California, Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 161: 2369–2378. doi:10.1007/S00024-004-2569-3

25. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. **2012(2011).** The current state of art in earthquake prediction, the typical precursors, and the experience in the earthquake forecasting at the Sakhalin Island and the surrounding areas. In: (Ed. Sebastiano D'Amico) *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*. Book 5, p. 43–79. doi:10.5772/28689

26. Vere-Jones D., Robinson R., Yang W. **2001.** Remarks on the accelerated moment release model: problems of model formulation, simulation and estimation. *Geophysical J. International*, 144: 517–531. https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2001.01348.x

27. Wang L., Shengli Ma, Li Ma. **2008.** Accelerating moment release of acoustic emission during rock deformation in the laboratory. *Pure and Applied Geophysics*, 165(2): 181–199. doi:10.1007/s00024-008-0305-0

28. Wells D.L., Coppersmith K.J. **1994.** New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. of the Seismological Society of America*, 84(4): 974–1002.

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

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

DISCUSSIONS

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.128-132.133-137

TRANSLATION

On the foreshock cascade and extraordinary predictions, in relevance to the article by A.I. Malyshev and L.K. Malysheva "Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region"*

Mikhail V. Rodkin[1,2,3]

[1]*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Russia*
[2]*Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*
[3]*Institute of Oil and Gas Problems, RAS, Russia*

**E-mail: rodkin@mitp.ru*

Abstract. Not so many issues, that have such a divergence of view, as on the existence and nature of foreshock activation. The range here is from public admission, that the previously described effect of foreshock avalanche-like activation is nothing more than the result of (though unconscious) data fitting, to the cases of incredibly accurate predictions of the time of strong earthquakes (though retrospective). The article by A.I. Malyshev and L.K. Malysheva, published in the current issue, gave a reason to return to these disagreements again and to offer a possible explanation for them.

Keywords: method of the self-developing processes, accelerated seismic moment release (AMR), foreshock cascade, random and systematic components of a seismic regime

For citation: Rodkin M.V. On the foreshock cascade and extraordinary predictions, in relevance to the article by A.I. Malyshev and L.K. Malysheva "Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region". *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, vol. 5, no. 2, pp. 128–137. (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.128-132.133-137

Acknowledgements and Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS (theme AAAA-A19-119011490129-0), Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS (theme AAAA-A18-118012290125-2.2) and Institute of Oil and Gas Problems RAS (theme AAAA-A19-119013190038-2) with a partial support from the RFBR (project № 19-05-00466).

Author is grateful to Leonid Bogomolov for the proposal to turn a peer review of the article into a full-fledged publication, for wishes to additionally discuss the number of important controversial issues and for the discussion during the publication preparing.

In quite distant 2009, when I happened to be an opponent of a doctor dissertation by I.N. Tikhonov, I was deeply impressed by the retrospective predictions of the time of a number of strong Sakhalin earthquakes that he obtained [Tikhonov, 2009, 2019, etc.]. To predict the time of strong earthquakes, Ivan Nikolaevich used the method of self-developing processes (SDP) by A.I. Malyshev in his own software implementation [Malyshev, 1991; Malyshev, Tikhonov, 1991, 2007; Tikhonov, 2008; Tikhonov, Rodkin, 2012; etc.]. The SDP method describes the development of a foreshock sequence by an escalation process; the general equation of the peaking process is set, a parameter (for example, seismic energy) and a time interval are selected; on the basis of these data, the timepoint, when the process reaches the vertical asymptote, can be calculated. That is amazing, but

* See this article in English in the current issue of the Journal.

Translation of the article published in the present issue of the Journal: М.В. Родкин. О форшоковом каскаде и удивительных прогнозах, в связи со статьей А.И. Малышева и Л.К. Малышевой «Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил». *Translation by G.S. Kachesova*

the time of some events was thus retrospectively guessed with an accuracy of several days or hours or even several minutes**. Note that for such extraordinary predictions, the seismic process data until the very moment of a strong earthquake were used; therefore, it is clear, that such predictions could not have been obtained otherwise than retrospectively.

Later on, the SDP method was applied and refined [Tikhonov et al., 2017; Zakupin et al., 2019; Malyshev, 2020; etc.]. However, the effectiveness of this method remains controversial. First of all, complaints are caused by the instability of prediction results and the problem of rejecting the false predictions; target omission errors are relatively less common.

The situation in the "international arena" developed in a very similar way, though under different names. An analogue of the self-developing avalanche-like process is called the "accelerated moment release model" (AMR model) in international terminology. Such a mode of accelerated growth of the seismic moment values was observed during a number of earthquakes and also raised hopes that, if the data analysis technique is refined, a satisfactory accurate prediction will soon be obtained [Bowman et al., 1998; Jaumé, Sykes 1999; Bowman, King, 2001; Sammis et al., 2004; etc]. The main difference between the approach of English-speaking authors and the approach based on the SDP method is that when discussing the AMR effect, the task is not posed to determine the moment, when the process reaches the vertical asymptote, and therefore the prediction of the event time turns out to be less certain and does not cause such strong bewilderment mixed with admiration, as separate results obtained by I.N. Tikhonov. At the same time, the development of the AMR model finds a natural interpretation both within the framework of the concept of the analogy of strong earthquakes with critical phenomena, and in terms of the effect of tectonic load increase, which actually brings to earthquakes [Bak, 1996; Bowman et al., 1998; Bowman, King, 2001].

However, the development of the AMR model met with serious objections. From the very beginning it was clear (as in the case of the SDP model) that the identification of the AMR anomaly and the anomaly nature essentially depend on the choice of the time interval for analysis. It is also unclear what does actually increase – whether the number of events increases or the average value of seismic events increases [Vere-Jones, 2001]. For many earthquakes the AMR anomaly was not observed, and for others it was observed only with a special choice of the time interval for the calculation. On the wave of such criticism, one of the promoters of this approach, D. Bowman, speaking at a conference in 2007, admitted that the previously presented AMR effect [Bowman et al., 1998] is most likely nothing more than a result of data fitting, even if not deliberate. In the same vein, the work [Hardebeck et al., 2008] concludes that the AMR type anomaly development is difficult to be formalized, statistically insignificant, and therefore cannot be used as a reliable predictive indicator.

Note, that the criticism of the reality of the AMR anomaly existence developed in the mainstream of a more general critical line of research. The very fundamental possibility of earthquake forecasting was reasonably questioned [Geller et al., 1997]. Simultaneously with the possibility of forecasting, such laws and characteristic features of the seismic regime as the existence of a foreshock cascade of activation, observance of the Omori law, the existence of characteristic earthquakes, a seismic cycle and seismic gaps which had been previously considered reliably, were called into question [Romashkova, Kosobokov, 2001; Hardebeck et al., 2008; Kagan et al., 2012]. All these phenomena did not find unambiguous statistical confirmation in the listed works and therefore were questioned. Quite quickly, the doubts were dispelled, may be only concerning the Omori law, but it is also interpreted as no more than a statistical trend, with indications of a very strong random component in the seismic regime, the possibility of a largely random occurrence of strong aftershocks and the development of secondary aftershock cascades.

It should be stressed, that the same situation takes place in the case of other questioned regularities of the seismic process. All of them are masked by a random component of the seismic

** It seemed completely implausible, but the author only threw up his hands answering my bewilderment – well, is it my fault that this happens, do I have to specially worsen and falsify the results obtained? At the same time, Ivan Nikolaevich himself laughed at such accuracy and did not forget to note that in most cases such a prediction does not work. But the ability to laugh at one's own prediction among earthquake predictors is not a frequent phenomenon, and it in itself already generates the trust. The defense was quite successful.

process and can only be more or less definitely guessed against the background of this dominant random component.

A well-known method of isolating the systematic component against the background of a strong random process is the statistical method of summing many examples, in each of which the overall systematic component can be almost invisible.

With regard to this case, such an approach was implemented in the method of constructing and analyzing the generalized vicinity of a large earthquake (GVLE) [Rodkin, 2008; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016; Rodkin, 2020]. When constructing the GVLE, those events are selected, that fall in the vicinity of one of a large number (several hundred, up to 1000) of the strongest earthquakes in the used catalog. The neighborhood is understood as events that occurred at a distance from the focus of a given main strong event of no more than n sizes of the focus of this main event. The number n is usually taken in the range 3–6. To calculate the size of the focus R (in kilometers) depending on the magnitude, one of the formulas given in [Sobolev, 1993; Wells, Coppersmith, 1994] is used; different formulas give qualitatively similar results. The experience in constructing the GVLE shows that when 100 or less strong events are used to construct the GVLE, rather strong fluctuations persist and the trends of change in the parameters under study turned to be masked.

The GVLE method confirmed the development of the power-law foreshock and aftershock cascades. A number of anomalies (partially unknown earlier) were also identified for other parameters of the seismic regime. Here we are interested in the nature of the foreshock anomaly. The Figure shows an example of the GVLE for foreshock and aftershock cascades according to the world ISC catalog, $n = 5$, the number of strongest earthquakes used in constructing the GVLE $N = 500$, the events with $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$ km were used when constructing.

The aftershock cascade (see Figure, b) fully corresponds to the generalized Omori – Utsu law of aftershock sequences relaxation. But the foreshock anomaly looks no less certainly (see Figure, a). By the nature of the increase in the foreshock power-law growth of the number of events (as well as by similar anomalies for the released seismic energy and the magnitude of the seismic moment), it is easy to predict the moment of a generalized strong earthquake. The error of this estimate will be no more than 10 minutes. Such an estimate may be obtained by applying the SDP method to the analysis of data on the growth of aftershock activity in the GVLE.

Comparison with the results obtained in the GVLE analysis allows us to propose an explanation for the contradictory conclusions discussed above about the nature of the foreshock process, the presence/absence of the SDP development and the presence/absence of the AMR effect. It seems possible to conclude that the SDP and its analog AMR effects take place, but in each specific case they turn out to be strongly masked by the dominant random component of the seismic regime, which is individual for the neighborhood and for each separate strong earthquake. In this regard, these effects are manifested with ample evidence in the GVLE only. When analyzing each separate strong earthquake, they are only guessed with varying degrees of uncertainty. However, it seems possible that in a number of cases the random

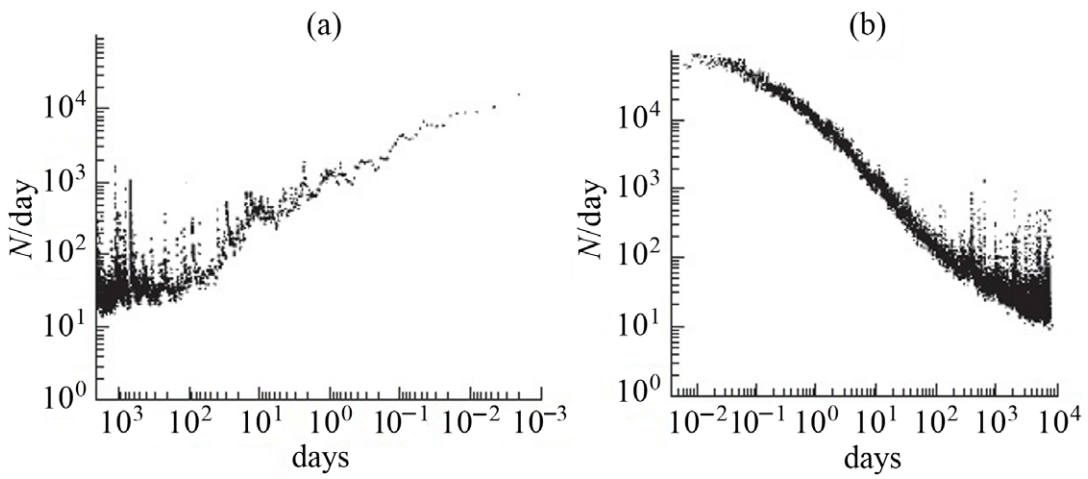


Figure. Dynamics of the foreshock (a) and aftershock (b) process in the GVLE, according to [Rodkin, 2020].

component of the seismic regime does not play a decisive role, and then the AMR anomaly regime manifests itself quite clearly, and the SDP method allows to obtain a good estimate of the moment of the corresponding strong event, as was sometimes observed from the results of calculations by I.N. Tikhonov.

Let us provide additional evidence in favor of the AMR effect existence, which significantly confirms the results of comparison with the conclusions obtained in the construction and analysis of the GVLE. The work [Wang, Ma, 2008] provides evidence of the observation of the AMR process analogue in laboratory studies of acoustic emission. And in [Cianchini et al., 2020], based on the results of the analysis of statistical data on the seismicity regime in the vicinity of the studied aggregate of strong earthquakes and their comparison with the results of numerical modeling, it was obtained that the observed AMR process is a real feature of the seismic regime in most of the considered cases, rather than its random fluctuation.

We conclude, that the avalanche-like SDP and the AMR effect are apparently a real characteristic feature of the foreshock process and, accordingly, can be used for predicting the earthquakes. In this case, the problem is to single out the informative systematic component against the background of strong and, apparently, random noise. In this context, the idea proposed in [Malyshev, Malysheva, 2021] to be guided by on similarity with the cases of the development of previously observed foreshock sequences when applying of the SDP method, seems to be rather controversial; however, the real efficiency of one or another earthquake forecasting algorithm can only be shown by the practice of its use in real time.

The existence of a whole complex of clear precursor anomalies in the GVLE is rather obvious. The presence of these anomalies implies the fundamental possibility of prediction, in particular, the possibility of a sufficiently accurate «prediction» of the time of a generalized large earthquake. It is unclear, however, what are the prospects for transferring this result to the case of a separate strong earthquake. What chances of that the considerable (2 orders of value or slightly more) growth of seismic data volume involved to this kind of predictions will allow obtaining the reasonable evaluation of the time of solitary major earthquake? Can we expect a prediction accuracy for such event similar to that for GVLE construction? Or even such a sharp increase in the amount of available information will not be effective, since this information will still be dominated by random features of this particular foreshock sequence? There is no answer to these questions yet.

References

1. Bak P. **1996.** *How Nature Works*. New York: Springer-Verlag, 212 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5426-1

2. Bowman D.D., King G.C.P. **2001.** Accelerating seismicity and stress accumulation before large earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 28(21): 4039–4042. https://doi.org/10.1029/2001GL013022

3. Bowman D.D., Ouillon G., Sammis C.G., Sornette A., Sornette D. **1998.** An observational test of the critical earthquake concept. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10): 24359–24372. https://doi.org/10.1029/98jb00792

4. Cianchini G., De Santis Ang., Giovambattista R.D., Abbattista C., Amoruso L., Campuzano S.A., Carbone M., Cesaroni C., De Santis Anna, Marchetti D. et al. **2020.** Revised accelerated moment release under test: Fourteen worldwide real case studies in 2014–2018 and simulations. *Pure and Applied Geophysics*, 177: 4057–4087. https://doi.org/10.1007/s00024-020-02461-9

5. Geller R.J., Jakson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. **1997.** Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275: 1616–1617. https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616

6. Hardebeck J.L., Felzer K.R., Michael A.J. **2008.** Improved tests reveal that the accelerating moment release hypothesis is statistically insignificant. *J. of Geophysical Research*, 113(B08310). doi:10.1029/2007JB005410

7. Jaumé S., Sykes L. **1999.** Evolving towards a critical point: A review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 155: 279–305. https://doi.org/10.1007/s000240050266

8. Kagan Y.Y., Jackson D.D., Geller R.J. **2012.** Characteristic earthquake model, 1884–2011, R.I.P. *Seismological Research Letters*, 83(6): 951–953. https://doi.org/10.1785/0220120107

9. Malyshev A.I. **1991.** Dynamics of self-developing processes. *Volcanology & Seismology*, 4: 61–72. (In Russ.).

10. Malyshev A.I. **2020.** Predictability of the seismic energy flux: Southern Europe and the Mediterranean. *J. of Volcanology and Seismology*, 14(1): 30–43. https://doi.org/10.1134/S0742046320010030

11. Malyshev A.I., Tikhonov I.N. **1991.** [Regularities of the dynamics of the foreshock and aftershock sequences in the region of South Kuril Islands]. *Doklady AN USSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 319(1): 134–137. (In Russ.).

12. Malyshev A.I., Tikhonov I.N. **2007.** Nonlinear regular features in the development of the seismic process in time. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 43(6): 476–489.

13. Rodkin M.V. **2008.** Seismicity in the generalized vicinity of large earthquakes. *J. of Volcanology and Seismology*, 2(6): 435–445. https://doi.org/10.1134/s0742046308060055

14. Rodkin M.V. **2012.** Patterns of seismicity found in the generalized vicinity of a strong earthquake: Agreement with common scenarios of instability development. In: *Extreme events and natural hazards: The complexity perspective*: Geophysical Monograph Series, 196. doi:10.1029/2011GM001060

15. Rodkin M.V. **2020.** Typical for- and aftershock anomaly – data, interpretation, application. *J. of Volcanology and Seismology*, 14(1): 58–69. https://doi.org/10.1134/s0742046320010066

16. Rodkin M.V., Tikhonov I.N. **2016.** The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake. *Physics and Chemistry of the Earth*, 95: 73–84. https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.04.001

17. Romashkova L.L., Kosobokov V.G. **2001.** [Seismicity dynamics prior to and after the largest earthquakes worldwide, 1985–2000]. *Vychislitel'naya seysmologiya* [*Calculating seismology*], 32: 162–189.

18. Sammis C., Bowman D., King G. **2004.** Anomalous seismicity and accelerating moment release preceding the 2001 and 2002 earthquakes in Northern Baja California, Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 161: 2369–2378. doi:10.1007/S00024-004-2569-3

19. Sobolev G.A. **1993.** [*The basis for earthquake prediction*]. Moscow: Nauka, 314 p

20. Tikhonov I.N. **2008.** [Earthquake prediction by the seismological data: methods, achievements, propects]. In: *Prirodnye katastrofy: izuchenie, monitoring, prognoz: sb. materialov II (XX) Sakhalinskoy molodezhnoy nauch. shkoly, Yuzhno-Sakhalinsk, 4–10 iyunya 2007 g.* (ed. O.N. Likhacheva) [*Natural hazards: study, monitoring, prediction: proceedings of the II (XX) Sakhalin youth scientific school, Yuzhno-Sakhalinsk, June 4–10, 2007* (ed. O.N. Likhacheva)]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN, p. 7–24.

21. Tikhonov I.N. **2009.** [*Methodology of strong earthquakes prediction by the seismicity flux on the example of northwestern part of the Pacific belt*]: [extended abstract of dissertation … doctor of Phys. and Math. Sciences]. Yuzhno-Sakhalinsk, 41 p.

22. [Tikhonov] **2019.** *Ivan Nikolaevich Tikhonov. Problems of seismology*: Selected works. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 209 p. Suppl.: 1 electronic opt. disk (DVD). doi:10.30730/978-5-6040621-4-2.2019-2

23. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. **2012(2011).** The current state of art in earthquake prediction, the typical precursors, and the experience in the earthquake forecasting at the Sakhalin Island and the surrounding areas. In: (Ed. Sebastiano D'Amico) *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*. Book 5, p. 43–79. doi:10.5772/28689

24. Tikhonov I.N., Mikhaylov V.I., Malyshev A.I. **2017.** Modeling the Southern Sakhalin earthquake sequences preceding strong shocks for short-term prediction of their origin time. *Russian J. of Pacific Geology*, 11(1): 1–10. https://doi.org/10.1134/s1819714017010092

25. Vere-Jones D., Robinson R., Yang W. **2001.** Remarks on the accelerated moment release model: problems of model formulation, simulation and estimation. *Geophysical J. International*, 144: 517–531. https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2001.01348.x

26. Wang L., Shengli Ma, Li Ma. **2008.** Accelerating moment release of acoustic emission during rock deformation in the laboratory. *Pure and Applied Geophysics*, 165(2): 181–199. doi:10.1007/s00024-008-0305-0

27. Wells D.L., Coppersmith K.J. **1994.** New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. of the Seismological Society of America*, 84(4): 974–1002.

28. Zakupin A.S., Boginskaya N.V., Andreeva M.Yu. **2019.** Methodological aspects of the study of seismic sequences by SDP (self-developing processes) on the example of the Nevel'sk earthquake on Sakhalin. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 377–389. (In Russ, abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389

Об авторе

Родкин Михаил Владимирович (ORCID: 0000-0001-8859-1527), доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (ИТПЗ РАН), Москва, rodkin@mitp.ru

About the Author

Mikhail V. Rodkin (ORCID: 0000-0001-8859-1527), Doctor of Physics and Mathematics, head of the laboratory, Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the RAS (IEPT RAS), Moscow, rodkin@mitp.ru

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

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

ДИСКУССИИ

УДК 550.343.6

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.138-145.145-152

Физические основы модели саморазвивающихся процессов и вопросы ее применения для прогнозов землетрясений в Дальневосточном регионе

© 2021 *Л. М. Богомолов*[*1], *В. Н. Сычев*[2]

[1] *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия,*
[2] *Научная станция РАН в г. Бишкеке, Киргизия*

**E-mail: l.bogomolov@imgg.ru*

Резюме. Описываемое моделью саморазвивающихся процессов (СРП) нарастание сейсмической активности в форшоковый период перед сильным землетрясением может быть проявлением взрывной неустойчивости низкочастотных деформационных волн в метастабильной среде. Обратить внимание на столь необычную взаимосвязь между непрерывными во времени волновыми движениями и дискретным потоком сейсмических событий – задача данного сообщения. Тем самым модифицировано обоснование модели (фактически уравнения) СРП, что имеет значение в связи со статьей А.И. Малышева и Л.К. Малышевой «Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил» в настоящем выпуске, посвященной совершенствованию оценок сейсмической опасности с применением этой модели. Предложен новый способ описать самое начало режима с обострением после квазистационарного режима.

Ключевые слова: уравнение модели саморазвивающихся процессов, последовательность форшоков, накопление сейсмических событий, взаимодействие волн, метастабильная среда, взрывная неустойчивость

Fundamental for self-developing processes model and problems of its application to earthquakes prediction in the Far East region

Leonid M. Bogomolov[*1], *Vladimir N. Sychev*[2]

[1]*Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*
[2]*Research Station RAS in Bishkek city, Kyrgyzstan*

**E-mail: l.bogomolov@imgg.ru*

Abstract. Seismic activation in the period of foreshocks (prior to the mainshock) described by the model of self-developing processes (SDP) is possibly a manifestation of explosive instability of low frequency straining waves in metastable medium. To highlight so nontrivial relationship of continuous wave motions and discrete seismic events flow is a goal of this narrative. Thus, the rationale of the SDP model (the equation, in reality) has been modified, which is of importance in relevance with the article by the Malyshevs in the current issue (A.I. Malyshev, L.K. Malysheva. Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and South Kurils region) which is to improve the seismic hazard estimates by means of this model. A new way to reveal the very beginning of blow-up regime after quasi-stationary one is proposed.

Keywords: equation of the self - developing processes model, foreshock sequence, seismic events accumulation, waves interaction, metastable medium, explosive instability

Для цитирования: Богомолов Л.М., СычевВ.Н. Физические основы модели саморазвивающихся процессов и вопросы ее применения для прогнозов землетрясений в Дальневосточном регионе. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 2, с. 138–152. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.138-145.145-152

***For citation*:** Bogomolov L.M., Sychev V.N. Fundamental for self-developing processes model and problems of its application to earthquakes prediction in the Far East region. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 138–152. (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.138-145.145-152

Введение

По мере развития подхода Малышева–Тихонова к средне- и краткосрочным оценкам времени землетрясения на основе модели саморазвивающихся процессов (СРП) [Малышев, 1991; Малышев, Тихонов, 1991] и накопления примеров удачных (оправдавшихся) прогнозов в Дальневосточном регионе [Малышев, Малышева, 2018, ст. в настоящем номере; Закупин и др., 2019] все большую значимость приобретает вопрос о физических основах этой модели. В этом подходе временная зависимость сейсмической активности перед сильным землетрясением описывается кинетическим уравнением, решение которого является сингулярным: оно нарастает неограниченно за конечный интервал времени. Это соответствует реализации известного в динамике нелинейных систем режима с обострением [Малинецкий, Потапов, 2002]. В обоих случаях основное свойство параметра состояния системы – быстрое нарастание со временем, превосходящее экспоненциальную зависимость. Но сходство с концепцией самоорганизации не может заменить физического обоснования используемого уравнения модели СРП.

Одним из итогов дискуссии 1990-х годов о предсказуемости или принципиальной непредсказуемости землетрясений [Debate… , 1996; Geller et al., 1997] стало требование, чтобы вариации геофизических полей, рассматриваемые в качестве предвестников землетрясения, были связаны с процессами подготовки очага землетрясения. Применительно к модели СРП эти требования могут быть частично удовлетворены при уточнении физической природы этой модели. В оригинальных работах [Малышев, 1991; Малышев, Тихонов, 1991; Tikhonov, Rodkin, 2012] исходное уравнение модели СРП связывалось с уравнением накопления поврежденностей в материалах в условиях малых изменений термодинамическх параметров [Voigt, 1989]. В последующих работах сейсмологов вопросам обоснования модели СРП не уделялось заметного внимания. Между тем в современном физическом материаловедении и механике усталостного разрушения уже не используется подход Фойгта [Волегов и др., 2015]. В связи с этим в данной заметке рассматриваются физические модели, следствием которых может стать модель СРП, описывающая возникновение режимов с обострением для форшоковых последовательностей.

Анализ уравнений модели СРП

Согласно [Малышев, Тихонов, 1991] и последующим работам, основополагающее уравнение модели СРП имеет форму

$$d^2 x/dt^2 = A_0 \,|\, (dx/dt)^{\lambda} - c^{\lambda} \,|^{\alpha/\lambda}, \text{ или}$$

$$dy/dt = A_0 \,|\, y^{\lambda} - c^{\lambda} \,|^{\alpha/\lambda} \qquad (1)$$

где $x(t)$ – параметр состояния, далее сопоставляемый с зависимостью от времени, количества произошедших событий или суммарным выделением сейсмической энергии; $y(t)$ – скорость изменения параметра x; A_0, α, λ, c – неопределенные положительные константы, причем в начальный момент времени $dx/dt > c$. При сравнении решений $x(t)$ с эмпирическими данными считалось, что параметр c в уравнении (1) пренебрежимо мал и не играет роли. Как следствие, вместо (1) использовалось упрощенное уравнение

$$dy/dt = A_0 \, y^{\alpha}, \qquad (2)$$

которое по форме совпадает с уравнением неустойчивого роста круглой (дисковой) трещины [Das, Scholz, 1981; Varnes, 1989] и с уравнением накопления поврежденностей в материалах в условиях малых изменений термодинамических параметров [Voigt, 1989]. Казалось бы, это обстоятельство может объяснить физический механизм модели СРП. Но при такой попытке возникает несоответствие с примерами землетрясений на Сахалине, предсказанных с использованием уравнения (2) [Малышев, Малышева, 2018; Закупин и др., 2019; Tikhonov, Kim, 2010]. Для всех событий, на которые в цитированных работах выдавался прогноз по модели СРП, очаговые подвижки происходили по уже существующим разломам. Стоит отметить, что на территории Сахалина плотность разломов различного ранга высока [Харахинов и др., 1984; Воейкова и др., 2007], и нет необходимости рассматривать новые разрывы.

Более перспективным представляется возможное объяснение модели СРП с позиций общей модели перехода процесса разрушения с микро- на макроуровень при накоплении определенного числа дефектов. Под дефектами в данном случае подразумеваются микротрещины в образцах геоматериалов, трещины в породных массивах, сейсмогенные разрывы среды (в зависимости от масштаба задачи) [Мячкин и др., 1975; Куксенко, 1986; Соболев, Завьялов, 1980; Завьялов, 2005]. Для поясне-

ния этой возможности рассмотрим критерий, по которому определяется время до возникновения макроразрыва, и сравним его с условием неограниченного нарастания параметра $y(t)$ из уравнения (2). Это время в модели СРП принимается за прогнозируемое время землетрясения. Для определенности, параметр $x(t)$ удобно сопоставить с накоплением числа событий $x \leftrightarrow N(t)$, тогда зависимости $y = dx/dt$ будет соответствовать сейсмическая активность $n(t)$.

Уравнение (2) легко интегрируется, и его решение с начальным условием $y(0) = y_0$ записывается в форме

$$y = y_0 / [1 - A_0 (\alpha - 1)\, y_0^{\alpha-1}\, t]^{1/(\alpha-1)} \qquad (3)$$

Выражение (3) показывает, что нарастающее во времени решение существует до момента сингулярности, t_S.

$$t_S = \frac{1}{A_0(\alpha-1)y_0^{\alpha-1}} = y_0\,[(\alpha-1)\,(dy/dt)|_{t=0}]^{-1} \qquad (4)$$

На этом выражении для t_S фактически основана оценка времени до землетрясения в модели СРП и ее англоязычном аналоге – AMR model (accelerated moment release model) [Varnes, 1989; Bowman et al., 1998; Jaumé, Sykes, 1999; Cianchini et al., 2020]. Но ввиду неточности определения скорости роста активности ($y_0 \leftrightarrow n(0) = n_0$) в самом начале режима с обострением, А.И. Малышев предложил специальные алгоритмы: ожидаемое время сильного землетрясения определяется по появлению «вертикальной асимптоты» к графику активности, соответствующей примерно десятикратному возрастанию $n(t) > 10\, n_0$ [Малышев, 1991; Малышев, Тихонов, 2007]. В недавних работах [Малышев, 2019, 2020] предложен способ уточнения времени t_S, в котором оставшееся время до сингулярности (асимптоты) переоценивается при смещении начальной точки на одно из событий в последовательности форшоков. Уточненная методика названа «прецедентно-экстраполяционной оценкой» (см. указанную статью в настоящем номере).

Из уравнения (3) также вытекает возможность прогноза по накоплению числа событий начиная с определенного момента времени (начала режима с обострением). Такое представление может оказаться более естественным для анализа сейсмических каталогов. Действительно, как отмечено в [Varnes, 1989], в случае $\alpha > 2$ при интегрировании (3) можно получить следующее выражение для параметра $x(t)$:

$$x(t) = \frac{1}{A_0(\alpha-2)\,y_0^{\alpha-2}}\,\{1 - [1 - A_0(\alpha-1)\,y_0^{\alpha-1}\;t\,]\}^{\frac{\alpha-2}{\alpha-1}}, \qquad (5)$$

в котором множитель перед фигурными скобками совпадает с предельным значением $x_{max} = x(t_S)$, и, таким образом, «критическое» число накопленных событий $N_S = N(t_S)$ определяется выражением

$$N_S = [A_0(\alpha-2)\, n_0^{\alpha-2}]^{-1} \quad \alpha > 2 \qquad (6)$$

Из (4), (6) вытекает, что N_S пропорционально начальному значению активности $n = n_0$ и времени t_S, в течение которого происходит ее нарастание:

$$N_S = n_0 t_S\,(\alpha-1)\,/\,(\alpha-2). \qquad (7)$$

В случае $\alpha = 2$ выражение (3) упрощается и дает при интегрировании следующее выражение, заменяющее (5):

$$x(t) = -\left(\frac{1}{A_0}\right) ln(1 - A_0 y_0 t) \qquad (8)$$

В этом случае при $t \to t_S$ параметр x, сопоставляемый с числом событий, неограниченно возрастает. Но, как отмечено в [Малышев, Тихонов, 2007; Tikhonov, Kim, 2010; Tikhonov, Rodkin, 2012], время t_{10}, за которое активность возрастает в 10 раз, мало отличается от t_S и может использоваться для прогноза по методу СРП. Из (3), (8) следует, что моменту t_{10} соответствует накопление событий N_{10}, определенное выражением $N_{10} = 2.303/A_0$.

В модели перехода процесса разрушения с микро- на макроуровень условие неустойчивости определяет концентрационный критерий сейсмогенных разрывов (КСР) [Соболев, Завьялов, 1980]. Этот критерий устанавливает предельное значение плотности разрывов η, т.е. их количества в единице объема. Если считать, что каждому сейсмическому событию соответствует «свой» разрыв, то число разрывов, при котором достигается критерий КСР, даст оценку для накопления числа событий до возникновения магистрального разрыва (ожидаемого землетрясения) $N_{max} = \eta_{max}\, V$, где V – выбранный объем среды. Предельное значение η_{max} можно выразить через минимальное отношение расстояния между разрывами, L, и их средней длиной $l_{ср}$, $k = L / l_{ср}$, значение k лежит

в пределах $k = 5–15$ [Соболев, Завьялов, 1980]. Используя эти формулы и известное соотношение $\eta = 1/L^3$, можно получить оценку для прироста числа событий к моменту времени, когда достигается критерий сейсмогенных разрывов:

$$N_{max} = V / (k\, l_{cp})^3 \qquad (9)$$

Входящее в (9) l_{cp} близко к длине разрыва для землетрясений с наименьшей магнитудой в выборке, этот параметр мало меняется по мере накопления событий. Таким образом, критерий прогноза в модели СРП может быть сформулирован в такой же форме, как и концентрационный критерий КСР. Это сходство свидетельствует, что модель СРП можно рассматривать как специальный случай общей модели возникновения магистрального разрыва.

Спецификой СРП является то, что в начальный момент времени коэффициент сейсмогенных разрывов уже близок к своему критическому значению. При этом даже небольшой каскад событий может проявиться в изменении параметров в обоих моделях. Из изложенного вытекает, что при ретроспективном анализе землетрясений на Сахалине, рассмотренных в работах [Тихонов и др., 2017; Закупин и др., 2019; Tikhonov, Kim, 2010; Tikhonov, Rodkin, 2012], можно обнаружить предвестники по изменению коэффициента сейсмогенных разрывов. Но проверка этой гипотезы выходит за рамки данной работы.

Взрывная неустойчивость волн – предпосылка или новое представление СРП-модели

Известное в теории нелинейных волн явление взрывной неустойчивости при трехволновом взаимодействии [Рыскин, Трубецков, 2017] может быть альтернативой для обоснования модели СРП с исходным уравнением (1). Рассмотрим эту возможность. Взрывная неустойчивость возникает при взаимодействии трех волн в метастабильной среде, причем хотя бы одна из взаимодействующих волн является волной с отрицательной энергией [Островский и др., 1986; Трубецков, Рожнёв, 2001]. К неустойчивости приводит то, что для волны с отрицательной энергией рост амплитуды и собственно энергии волны сопровождается уменьшением энергии системы, а при отборе энергии у такой волны (за счет диссипации или связи с обычной волной с положительной энергией) происходит ее нарастание [Островский и др., 1986]. Стоит подчеркнуть, что волны отрицательной энергии могут возникать только в метастабильной (неравновесной) среде, например в потоковых системах, содержащих пучки заряженных частиц или сдвиговые течения электрически нейтральной жидкости.

Сейсмогенерирующие зоны в южной части о. Сахалин, для которых выдавались прогнозы методом СРП [Тихонов и др., 2017] и где имеются системы разломов [Харахинов и др., 1984; Воейкова и др., 2007] и локализованы деформации сдвига, предположительно являются такими метастабильными системами. Для описания деформационных волн в разломно-блочной среде предложены нелинейные волновые уравнения [Николаевский, 1996; Быков, 2005, 2018]. Наиболее детально исследовалось волновое уравнение типа «синус Гордон» [Быков, 2018]. Показано, что скорость распространения таких волн значительно меньше, чем сейсмических, и характерное время распространения волны по региону может составить несколько суток или недель (т.е. сравнимо по длительности с некоторыми реализациями СРП).

Однако эти уравнения не могут адекватно учитывать наличие в среде метастабильных зон, и неудивительно, что для них не рассматривались решения с описанием взрывной неустойчивости при трехволновом взаимодействии. В данной работе исходим из общефизической модели взрывной неустойчивости [Рыскин, Трубецков, 2017]. В простейшем случае пространственно-однородной среды система уравнений для амплитуд трех взаимодействующих волн a_1, a_2, a_3 записывается в форме

$$da_1/dt = A\, a_2\, a_3 \cos\varphi,\ da_2/dt = A\, a_1\, a_2 \cos\varphi,$$
$$da_3/dt = A\, a_2\, a_3 \cos\varphi,$$

$$d\varphi/dt = -(a_1\, a_2/a_3 + a_2\, a_3/a_1 + a_1\, a_3/a_2) \sin\varphi\,,$$
$$\varphi = \varphi_3 - \varphi_2 - \varphi_1, \qquad (10)$$

где A – коэффициент, отражающий масштаб времени, φ_1, φ_2, φ_3 – фазы волн. Знаки фаз в выражении (10) соответствуют нумерации волн: 1, 2 – с отрицательной энергией, 3 – с положительной. Система уравнений (10) существенно упрощается, если амплитуды волн были одинаковыми в начальный момент времени. Тогда, как видно из (10), они будут одинаковыми и в последующее время: $a_1 = a_2 = a_3 = a$, и вместо (10) можно записать систему из двух уравнений:

$$da/dt = A\, a^2 \cos\varphi,\ d\varphi/dt = -3A\, a \sin\varphi. \quad (11)$$

Согласно (11), амплитуда волн a растет при $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$ и уменьшается при $|\varphi| > \pi/2$. Для уравнений (11) существует интеграл движения (сохраняющаяся величина):

$$a^3 \sin\varphi = \text{const} = a_0^3 \sin\varphi_0. \quad (12)$$

Если начальная фаза $\varphi_0 = 0$, то уравнение для амплитуды сводится к виду $da/dt = A\, a^2$ и его решение совпадает с выражением (3), где нужно положить $\alpha = 2$. Проводя переобозначения в (4) $y \to \alpha$, $A_0 \to A$, легко получить выражение для времени, в течение которого существует нарастающее решение $t_S = 1/Aa_0$.

При ненулевой начальной фазе φ_0, исключая $\cos\varphi$ в уравнении для амплитуды (11) с помощью соотношений $\cos\varphi = \pm(1 - \sin^2\varphi)^{1/2}$, $\sin\varphi = a_0^3 \sin\varphi_0 / a^3$, можно получить следующее уравнение первого порядка:

$$da^2/dt = \pm 2\, A\, (a^6 - a_0^6 \sin^2\varphi_0)^{1/2}. \quad (13)$$

По своей форме уравнение (13) сходно с уравнением (1) для параметра y. Квадрат амплитуды волны пропорционален ее энергии, причем энергия волны определяется для волнового потока, проходящего некоторую площадку за единичное время. Это позволяет придать физический смысл параметру y, который выше в уравнении (1) вводился феноменологически: $y(t)$ отражает выделение энергии в единицу времени.

Сопоставление этого параметра с сейсмической активностью может быть оправданным, когда рассматриваются выборки событий в узком диапазоне магнитуд. Но именно так и анализировались форшоковые каскады в работах [Тихонов и др., 2017; Tikhonov, Kim, 2010; Tikhonov, Rodkin, 2012; и др.], посвященных прогнозам времени землетрясения на основе модели СРП.

Уравнение (13) допускает решение в квадратурах. Для записи этого решения удобно ввести новую переменную

$$\xi = a^2/(a_0^2 \sin^{2/3}). \quad (14)$$

После замены переменной в (13) получим следующее уравнение:

$$(\xi^3 - 1)^{-1/2}\, d\xi/dt = 2Aa_0 \sin^{1/3}\varphi_0 \quad (15)$$

решение которого с начальным условием $\xi(0) = \xi_0 = \sin^{2/3}\varphi_0$, $0 < \varphi_0 \le \pi/2$ можно записать в форме

$$t = 1/(2\, A\, a_0 \sin^{1/3}\varphi_0) \int_{\xi_0}^{\xi} dz/(z^3 - 1)^{1/2}. \quad (16)$$

Интеграл в (16) выражается через специальную функцию – нормальный эллиптический интеграл 1 рода $F(\Psi, k)$ [Прудников и др., 1984]:

$$t = (2\, A\, a_0 \sin^{1/3}\varphi_0)^{-1} [F(\Psi_0, k) - F(\Psi, k)] / \sqrt[4]{3}, \quad (17)$$

где $k = \sin\pi/12 \approx 0.2588$,

$$\cos\Psi_0 = \frac{1 - (\sqrt{3}+1)\sin^{2/3}\varphi_0}{1 + (\sqrt{3}-1)\sin^{2/3}\varphi_0}, \quad (18)$$

$$\cos\Psi = \frac{a^2/a_0^2 - (\sqrt{3}+1)\sin^{2/3}\varphi_0}{a^2/a_0^2 + (\sqrt{3}-1)\sin^{2/3}\varphi_0},$$

но из-за громоздкости записи (17), (18) для численных оценок удобнее выражение в квадратурах. Так, в частности, время нарастания амплитуды до бесконечности можно выразить через функцию от начальной фазы φ_0: $t_S = J(\varphi_0)/(A\alpha_0)$. Для особого случая $\varphi_0 = 0$ функция $J = 1$, а для ненулевых φ_0 из интервала $0 < \varphi_0 \le \pi/2$ функция $J(\varphi_0)$ определяется выражением

$$J(\varphi_0) = 1/(2 \sin^{1/3}\varphi_0) \int_{\xi_0}^{\infty} dz/(z^3 - 1)^{1/2}, \quad (19)$$

$\xi_0 = 1/\sin^{2/3}\varphi_0 > 1$.

Для интервала $\pi/2 < \varphi_0 < \pi$, на котором амплитуда убывает, а фаза нарастает со временем, значения $J(\pi_0)$ определяются выражением (промежуточные выкладки опущены):

$$J(\varphi_0) = 2\, J(\pi/2) - J(\pi - \varphi_0). \quad (20)$$

Наибольший интерес представляет случай $\varphi_0 = \pi/2$, когда в начальный момент времени $da/dt = 0$ и уравнение (13) может моделировать переход из квазистационара в режим с обострением. В этом случае $J(\pi/2) = 1.214$, что отличается от особого случая $\varphi_0 = 0$ примерно на 20 %. Поскольку время существования нарастающих решений уравнения (13) или (15) равно $t_S = J(\varphi_0)/(Aa_0)$, то и t_S меняется лишь на величину около 20 % при изменении начальной фазы 0 до $\pi/2$. Этот результат можно использовать при анализе форшоковых последовательностей для поисков режимов с обострением. При сравнении эмпирических данных с урав-

Приведем значения функции $J(\varphi_0)$ для некоторых значений начальной фазы.

φ_0	0	π/12	π/6	π/4	π/3	5π/12	π/2	7π/12	2π/3	3π/4	5π/6	11π/12	π
$J(\varphi_0)$	1	1.005	1.020	1.046	1.085	1.140	1.214	1.289	1.344	1.383	1.409	1.424	2.429

нением (13) возникает задача подбора трех неопределенных коэффициентов A, a_0, φ_0. При пробном выборе интервала с начальной точкой до быстрого нарастания активности (на квазистационаре) удобно задать $\varphi_0 = \pi/2$. Далее вместо подбора двух параметров A_0, а для уравнения (1) находить значения A, a_0, дающие наилучшее сходство с решением (13). Это позволяет получить явную оценку времени t_S, которая используется для прогноза.

Обсуждение и выводы

В завершение стоит отметить особое свойство взрывной неустойчивости волн в среде с неоднородностью – наличие порога по амплитуде волны с отрицательной энергией [Рабинович и др., 1974; Захаров, Манаков, 1975; Bers et al., 1976]. Согласно этим и другим работам, только при достаточно большой начальной амплитуде волны с отрицательной энергией (при сильной энергетической накачке) происходит локализация волн на неоднородности и нарастание их амплитуд. При начальной амплитуде ниже порога выделяющаяся энергия уносится из области неоднородности, имеет место так называемая конвективная неустойчивость [Трубецков, Рожнёв, 2001]. Если перенести эти результаты на случай форшоковых последовательностей (СРП), можно допустить, что имеется дополнительное условие, при котором решения СРП, обнаруженные алгоритмом А.И. Малышева, дают предвестник землетрясения. Это условие сводится к наличию событий с повышенной магнитудой в начале последовательности, подчиняющейся уравнению СРП (1) или (2). После проверки допущения о дополнительном «фильтре» решений СРП по имеющимся примерам [Закупин и др., 2019] и, что еще важнее, по новым данным о сейсмических активациях перед главным событием, это допущение может объяснить различие оценок методов СРП и AMR. В одних работах (ссылки приведены выше) методы СРП или AMR считаются эффективными или, по крайней мере, приемлемыми для прогноза времени землетрясения, а в других [Vere-Jones, 2001; Hardebeck et al., 2008] – статистически не оправданными.

Нарастание сейсмической активности перед главным событием, описываемое моделью СРП, может быть проявлением (т.е. сопровождать) различных по своей природе процессов. Выше рассмотрены примеры таких физических процессов: накопление сейсмогенных разрывов и развитие взрывной неустойчивости. Модель СРП может считаться физической, а не феноменологической моделью (пусть даже сходной с концепцией самоорганизации), включающей в себя возникновение режимов с обострением. Несмотря на этот вывод, модель СРП является слишком упрощенной по сравнению с другими известными моделями подготовки очага землетрясения. При применении этой модели для разных сейсмоопасных регионов эффективность прогнозов времени землетрясения (процент успешных прогнозов к общему числу землетрясений с магнитудой не ниже, чем у «предсказанных») может существенно различаться. Особенность (а возможно, интереснейший прецедент) южной части о. Сахалина – достаточно высокая эффективность этой модели. Действительно, за сравнительно короткое время, менее 20 лет, И.Н. Тихонов, А.И. Малышев и А.С. Закупин выдали 6 успешных прогнозов, в том числе заблаговременный прогноз Невельского землетрясения 2.08.2007, M = 6.2. Количество ложных тревог и пропусков цели за тот же период – не более 3. Но магнитуда всех предсказанных событий была менее 6.5.

Предстоит проверка эффективности модели СРП для более сильных землетрясений в Дальневосточном регионе России. Поэтому весьма актуален предложенный в статье А.И. Малышева и Л.К. Малышевой новый вариант использования модели СРП для оценки сейсмической опасности. В этой работе для уточнения оценок времени главного события привлекается информация о событиях из интервала с нарастанием активности (прецедентах) и оценки названы прецедентно-экстраполяционными. Перспективно также совершенствование самой модели (расширение класса уравнений, описывающих форшоковые последовательности, введение в модель СРП дополнительных параметров), направленное на более раннее обнаружение начала «взрывного» нарастания активности перед главным событием.

Список литературы

1. Быков В.Г. **2005.** Деформационные волны в Земле: концепции, наблюдения и модели. *Геология и геофизика*, 46(11): 1176–1190

2. Быков В.Г. **2018.** Предсказание и наблюдение деформационных волн Земли. *Геодинамика и тектонофизика*, 9(3), 721–754. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0369

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

4. Волегов П.С., Грибов Д.С., Трусов П.В. **2015.** Поврежденность и разрушение: классические континуальные теории. *Физическая мезомеханика*, 18(4), 68–87.

5. Завьялов А.Д. **2005.** От кинетической теории прочности и концентрационного критерия разрушения к плотности сейсмогенных разрывов и прогнозу землетрясений. *Физика твердого тела*, 47(6), 1000–1008.

6. Закупин А.С., Богинская Н.В., Андреева М.Ю. **2019.** Методические аспекты исследования форшоковых последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине. *Геосистемы переходных зон*, 3(4): 377–389. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389

7. Захаров В.Е., Манаков С.В. **1975.** Теория резонансного взаимодействия волновых пакетов в нелинейных средах. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 69(5): 1654–1673.

8. Куксенко В.С. **1986.** Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел. *Физика прочности и пластичности*: сб. статей (ред. С.Н. Журков). Л.: Наука, с. 36–41.

9. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. **2002.** *Современные проблемы нелинейной динамики*. 2-е изд., испр. и доп. М.: Эдиториал УРСС, 358 с.

10. Малышев А.И. **1991.** Динамика саморазвивающихся процессов. *Вулканология и сейсмология*, 4:61–72.

11. Малышев А.И. **2019**. Прогнозируемость сейсмического потока и сильных землетрясений Камчатки в 1962–2014 г. *Вулканология и сейсмология*, 1: 52–66.

12. Малышев А.И. **2020.** Прогнозируемость потока сейсмической энергии Южной Европы и Средиземноморья. Вулканология и сейсмология, 1: 33–48.

13. Малышев А.И., Малышева Л.К. **2018.** Прогнозируемость потока сейсмической энергии северо-западного обрамления Тихого океана по данным каталога USGS. *Геосистемы переходных зон*, 2(3): 141–153. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.141-153

14. Малышев А.И., Тихонов И.Н. **1991.** Закономерности динамики форшок-афтершоковых последовательностей землетрясений в районе Южных Курильских островов. *Доклады АН СССР*, 319(1): 134–137.

15. Малышев А.И., Тихонов И.Н. **2007.** Нелинейные закономерности развития сейсмического процесса во времени. *Физика Земли*, 6, 37–51.

16. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. **1975.** Основы физики очага и предвестники землетрясений. В кн.: *Физика очага землетрясения*. М.: Наука, с. 6–29.

17. Николаевский В.Н. **1996.** *Геомеханика и флюидодинамика*. М.: Недра, 447 с.

18. Островский Л.А., Рыбак С.А., Цимринг Л.Ш. **1986.** Волны отрицательной энергии в гидродинамике. *Успехи физических наук*, 150(3), 117–137.

19. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. **1984.** *Интегралы и ряды*. М.: Наука, 800 с.

20. Рабинович М.И., Реутов В.П., Цветков А.А. **1974.** О слиянии волновых импульсов и пучков при взрывной неустойчивости. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 67(8), 525–532.

21. Рыскин Н.М., Трубецков Д.И. **2017.** *Нелинейные волны*. М.: ЛЕНАРД, 312 с.

22. Соболев Г.А., Завьялов А.Д. **1980.** О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов. *Докл. АН СССР*, 252 (1): 69–71.

23. Тихонов И.Н., Михайлов В.И., Малышев А.И. **2017.** Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предваряющих сильные толчки, с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 5–14.

24. Трубецков Д.И., Рожнёв А.Г. **2001.** *Линейные колебания и волны*. М.: Физматлит, 416 с.

25. Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. **1984.** Разломы Сахалина. *Тихоокеанская геология*, 2: 77–86.

26. Bers A., Kaup D.J., Reiman A.H. **1976.** Nonlinear interaction of three wave packets in a homogeneous medium. *Physical Review Letters*, 37(4): 182–185. https://doi.org/10.1103/physrevlett.37.182

27. Bowman D.D., Ouillon G., Sammis C.G., Sornette A., Sornette D. **1998.** An observational test of the critical earthquake concept. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10): 24359–24372. https://doi.org/10.1029/98jb00792

28. Cianchini G., De Santis Ang., Giovambattista R.D., Abbattista C., Amoruso L., Campuzano S.A., Carbone M., Cesaroni C., De Santis Anna, Marchetti D. et al. **2020.** Revised accelerated moment release under

test: Fourteen worldwide real case studies in 2014–2018 and simulations. *Pure and Applied Geophysics*, 177: 4057–4087. https://doi.org/10.1007/s00024-020-02461-9

29. Das S., Scholz C. H. **1981.** Theory of time-dependent rupture in the Earth. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 86: 6039–6051. https://doi.org/10.1029/jb086ib07p06039

30. Debate on evaluation of the VAN Method: Editor's introduction. **1996.** *Geophysical Research Letters*, 23(11): 1291–1293. https://doi.org/10.1029/96gl00742

31. Geller R. **1997.** Earthquake prediction: critical review. *Gephysical J. International*, 131(3): 425–450. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1997.tb06588.x

32. Hardebeck J.L., Felzer K.R., Michael A.J. **2008.** Improved tests reveal that the accelerating moment release hypothesis is statistically insignificant. *J. of Geophysical Research*, 113(B08310). doi:10.1029/2007JB005410

33. Jaumé S., Sykes L. **1999.** Evolving towards a critical point: A review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 155: 279–305. https://doi.org/10.1007/s000240050266

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

35. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. **2012(2011).** The current state of art in earthquake prediction, the typical precursors, and the experience in the earthquake forecasting at the Sakhalin Island and the surrounding areas. In: (Ed. Sebastiano D'Amico) *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*. Book 5, p. 43–79. doi:10.5772/28689

36. Vere-Jones D., Robinson R., Yang W. **2001.** Remarks on the accelerated moment release model: problems of model formulation, simulation and estimation. *Geophysical J. International*, 144: 517–531. https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2001.01348.x

37. Voight B. **1989.** A relation to describe rate-dependent material failure. *Science*, 243(4888): 200–203. https://doi.org/10.1126/science.243.4888.200

38. Varnes D.J. **1989.** Predicting earthquakes by analyzing accelerating precursory seismic activity. *Pure and Applied Geophysics*, 130(4): 661–686. https://doi.org/10.1007/bf00881603

DISCUSSIONS

УДК 550.343.6

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.138-145.145-152

TRANSLATION

Fundamental for self-developing processes model and problems of its application to earthquakes prediction in the Far East region

© 2021 *Leonid M. Bogomolov**[1], *Vladimir N. Sychev*[2]

[1]*Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*
[2]*Research Station RAS in Bishkek city, Kyrgyzstan*

**E-mail: l.bogomolov@imgg.ru*

Abstract. Seismic activation in the period of foreshocks (prior to the mainshock) described by the model of self-developing processes (SDP) is possibly a manifestation of explosive instability of low frequency straining waves in metastable medium. To highlight so nontrivial relationship of continuous wave motions and discrete seismic events flow is a goal of this narrative. Thus, the rationale of the SDP model (the equation, in reality) has been modified, which is of importance in relevance with the article by the Malyshevs in the current issue (A.I. Malyshev, L.K. Malysheva. Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and South Kurils region) which is to improve the seismic hazard estimates by means of this model. A new way to reveal the very beginning of blow-up regime after quasi-stationary one is proposed.

Keywords: equation of the self - developing processes model, foreshock sequence, seismic events accumulation, waves interaction, metastable medium, explosive instability

***For citation*:** Bogomolov L.M., Sychev V.N. Fundamental for self-developing processes model and problems of its application to earthquakes prediction in the Far East region. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 138–152. (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.138-145.145-152.

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Богомолов Л.М., Сычев В.Н. Физические основы модели саморазвивающихся процессов и вопросы ее применения для прогнозов землетрясений в Дальневосточном регионе. *Translation by G.S. Kachesova.*

Introduction

With the development of the Malyshev – Tikhonov approach to mid-term and short-term estimates of the earthquake time on the basis of the self - developing processes model (SDP) [Malyshev, 1991; Malyshev, Tikhonov, 1991] and accumulation of the successful (realized) predictions in the Far East region [Malyshev, Malysheva, 2018, the article in the current issue; Zakupin et al., 2019], the problem of the SDP model fundamentals becomes more and more significant. This approach describes the time dependence of seismic activity before a large earthquake with a kinetic equation, the solution of which is singular: it grows without limit during the finite time. This corresponds to the realization of the blow-up regime known in the dynamics of nonlinear systems [Malinetskiy, Potapov, 2002]. In both cases, the main property of the parameter of system state is its rapid temporal growth, exceeding the exponential rate. But the similarity to the concept of self-organization cannot replace the physical grounds of the used SDP model equation.

A resuming note of hiring debates of the 1990s on the earthquakes predictions possibility or impossibility in principle [Debate… , 1996; Geller et al., 1997] stated that geophysical fields variations, considered as precursors of an earthquake, must be related to the processes of the earthquake source preparation. One can satisfy partially such request for the SDP model by refining the "SDP" physical nature. In original works [Malyshev, 1991; Malyshev, Tikhonov, 1991; Tikhonov, Rodkin, 2012], the initial equation of the SDP model was associated with the equation of damage accumulation in materials in the settings of small change in thermodynamic parameters [Voigt, 1989]. Subsequent works of seismologists did not pay considerable attention to the problems of the SDP validation. Meanwhile, Voigt's approach is no longer used in modern physical material science and mechanics of fatigue fracture [Volegov et al., 2015]. In this regard, the present note considers physical models resuling in the re-formulation of the SDP model to describe blow-up regimes occuttnce for foreshock sequences.

Analysis of the SDP model equations

According to [Malyshev, Tikhonov, 1991] and subsequent works, the main equation of the SDP model has a form

$$d^2 x/dt^2 = A_0 \,|\, (dx/dt)^\lambda - c^\lambda |^{\alpha/\lambda}, \text{ or}$$
$$dy/dt = A_0 \,|\, y^\lambda - c^\lambda |^{\alpha/\lambda} \qquad (1)$$

where $x(t)$ – is the state parameter, related below to the temporal dependence of the number of event occurred, or to that of total release of seismic energy, $y(t)$ – rate of change in x parameter; A_0, α, λ, c – indefinite positive constants, and at the initial time moment $dx/dt > c$. When comparing the solutions $y(t)$ with the empirical data the parameter c in equation (1) is assumed to be negligible and does not play any role. Hence, we used the simplified equation instead of (1)

$$dy/dt = A_0 \, y^\alpha, \qquad (2)$$

which form is identical to the equation of unstable growth of a circular (disk-shaped) crack [Das, Scholz, 1981; Varnes, 1989] and with the equation of damage accumulation in materials in the settings of small change in thermodynamic parameters [Voigt, 1989]. Seemingly, this circumstance can explain the physical mechanism of the SDP model. But, a discrepancy arises with the examples of earthquakes on Sakhalin, predicted using equation (2) [Malyshev, Malysheva, 2018; Zakupin et al., 2019; Tikhonov, Kim, 2010], and it prevents the exlanation attempt. For all events for which the predictions were made in the cited works using the SDP model, focal movements occurred along the already existing faults. It should be noted, that the density of faults of various ranks on the territory of Sakhalin is high [Kharakhinov et al., 1984; Voeikova et al., 2007], so, there is no need to consider new breaks.

A possible explanation of the SDP model from the standpoint of the general model of the fracture process transition from the micro- to the macrolevel (due to accumulation of a certain number of defects and the coalescence), seems to be more promising. Defects, in this case, mean microcracks in geomaterials specimens, cracks in rock masses, seismogenic ruptures of the medium (depending on the problem scale) [Myachkin et al., 1975; Kuksenko, 1986; Sobolev, Zav'yalov, 1980; Zav'yalov, 2005]. To clarify this possibility, let us consider the criterion by which the time before the occurrence of a macroscopic rupture is determined and compare it with the condition of an indefinite increase in the parameter $y(t)$ from equation (2). This time in the SDP model is taken as the earthquake predicted time. For certainty, it is convenient to compare the parameter $x(t)$ with the accumulation of the events number $x \leftrightarrow N(t)$, then the seismic activity $n(t)$ will correspond to the dependence $y = dx / dt$.

Equation (2) is easily integrated and its solution with the initial condition $y(0) = y_0$ can be written in the form

$$y = y_0 / [1 - A_0 (\alpha - 1)\, y_0^{\alpha-1}\, t]^{1/(\alpha-1)} \quad (3)$$

Expression (3) shows that a solution, which grows in time, exists until the singularity moment, t_S.

$$t_S = \frac{1}{A_0(\alpha-1)y_0^{\alpha-1}} = y_0\,[(\alpha-1)\,(dy/dt)|_{t=0}]^{-1} \quad (4)$$

Estimates of the time up to an earthquake moment in the SDP model is actually based on this expression for t_S. The thing is so for the AMR model (accelerated moment release model), the and English-language analogue of the SDP [Varnes, 1989; Bowman et al., 1998; Jaumé, Sykes 1999; Cianchini et al., 2020]). But due to the inaccuracy of determining the rate of activity growth ($y_0 \leftrightarrow n(0) = n_0$) at the very beginning of the blow-up regime, A.I. Malyshev proposed special algorithms: the expected time of a large earthquake is determined by the appearance of a "vertical asymptote" to the activity graph corresponding to an approximately tenfold increase in $n(t) > 10\, n_0$ [Malyshev, 1991; Malyshev, Tikhonov, 2007]. Recent works [Malyshev, 2019, 2020] proposed a method for refining the time t_S, in which the remaining time to the singularity (asymptote) is revaluated when the initial point is shifted for one of the events in the foreshock sequence. The refined methodology is called "precedent-extrapolation estimate" (see the above-mentioned article in this issue).

The possibility of predicting the accumulation of the events number starting from a certain time moment (the beginning of the blow-up regime) also results from the expression (3). Such representation may become more natural for the analysis of seismic catalogs. Indeed, as it is noted in [Varnes, 1989], one can obtained the following expression for the parameter $x(t)$ by integration of (3) in the case of $\alpha > 2$:

$$x(t) = \frac{1}{A_0(\alpha-2)\,y_0^{\alpha-2}}\,\{1 - [1 - A_0(\alpha-1)\,y_0^{\alpha-1}\;\; t\,]\}^{\frac{\alpha-2}{\alpha-1}}, \quad (5)$$

where the factor in front of the curly braces coincides with the limit value $x_{max} = x(t_S)$, and, thus, the "critical" number of accumulated events $N_S = N(t_S)$ is determined by the expression

$$N_S = [A_0(\alpha-2)\, n_0^{\alpha-2}]^{-1} \quad \alpha > 2 \quad (6)$$

It results from (4), (6), that N_S is proportional to the initial value of activity $n = n_0$ and time t_S, during which it increases:

$$N_S = n_0 t_S\,(\alpha-1)\,/\,(\alpha-2). \quad (7)$$

When $\alpha = 2$, expression (2) is simplified, and its integration results in the following expression, replacing (5), when integrating:

$$x(t) = -\left(\frac{1}{A_0}\right) ln(1 - A_0 y_0 t) \quad (8)$$

In this case, parameter x, associated with the events number, indefinitely increases when $t \to t_S$. But, as it is noted in [Malyshev, Tikhonov, 2007; Tikhonov, Kim, 2010; Tikhonov, Rodkin, 2012], time t_{10}, during which the activity increases by 10 times, differs insignificantly from t_S and can be used for the predictions by means of the SDP method. It results from (3), (8), that the moment t_{10} is correspondent with the events accumulation N_{10}, determined by the expression $N_{10} = 2.303/A_0$.

The condition of instability determines the concentration criterion of seismogenic ruptures (CSR) in the model of the fracture process transition from the micro to the macrolevel [Sobolev, Zavyalov, 1980]. This criterion sets the limit value for the density of ruptures η, i.e. their quantity per unit volume. If we assume, that each seismic event corresponds to its "own" rupture, then the number of ruptures, at which the CSR criterion is achieved, will provide an estimate for the accumulation of the events number before the occurrence of a main rupture (expected earthquake) $N_{max} = \eta_{max}\, V$, where V is the selected volume of the medium. Limiting value η_{max} can be expressed through the minimum ratio of a distance between the ruptures, L, and their average length l_{av}, $k = L / l_{av}$, the k value is in the range $k = 5$–15 [Sobolev, Zavyalov, 1980]. Using these formulae and well-known relation $\eta = 1/L^3$, it is possible to obtain the estimate for the increase in events number by the time moment, when the seismogenic ruptures criterion is reached:

$$N_{max} = V / (k\, l_{av})^3 \quad (9)$$

Included in (9) l_{av} is close to the length of a rupture for earthquakes of a lowest magnitude in the sample, this parameter varies insignificantly as events are accumulated. Thus, the prediction criterion in the SDP model can be formulated in the same form, as the concentration criterion (K_{av}). This conformity speaks in a favor that the SDP model is a special case of a general model of major break occurrence.

A peculiar feature of the SDP is that the coefficient of seismogenic ruptures is already close to

its critical value at the initial time moment. This is a case when cascade of even a small events number is able to manifest itself in the change in parameters of both models. It follows from the above, that a retrospective analysis of the earthquakes in Sakhalin, considered in the works [Tikhonov et al., 2017; Zakupin et al., 2019; Tikhonov, Kim, 2010; Tikhonov, Rodkin, 2012], allows to find the precursors by change in the coefficient of seismogenic ruptures. But the test of this hypothesis is beyond the scope of this work.

Wave explosive instability – a prerequisite or a new representation of the SDP model

The phenomenon of explosive instability during three-wave interaction, known in the theory of nonlinear waves [Ryskin, Trubetskov, 2017], can be an alternative for rationale for the SDP model with the original equation (1). Let's consider this possibility. Explosive instability arises when three waves interact in a metastable medium, and at least one of the interacting waves is a negative energy wave [Ostrovskiy et al., 1986; Trubetskov, Rozhnev, 2001]. Instability is caused by that an increase in both: amplitude and energy of "negative energy" waves is accompanied by a decrease in the energy of the system. So, the wave amplitude grows when the energy is taken from such a wave (due to dissipation or connection with an ordinary positive energy wave) [Ostrovskiy et al., 1986]. It should be emphasized, that negative energy waves can arise only in a metastable (nonequilibrium) medium, for example, in the stream systems, which contain charged particle beams or shear flows of an electrically neutral liquid.

Seismogenic zones in the southern part of Sakhalin Island are presumably such metastable systems. Let us remark that for this subregion the predictions were made using the SDP method [Tikhonov et al., 2017], and the faults systems are presented widely [Kharakhinov et al., 1984; Voeykova et al., 2007], and shear deformations are localized in the fault zones. Nonlinear wave equations are proposed to describe deformation waves in the fault block medium [Nikolaevsky, 1996; Bykov, 2005, 2018]. The wave equation of sine-Gordon type was studied in more details [Bykov, 2018]. It is shown, that such waves propagation rate is much lower than that for seismic ones, and typical time of a wave propagation over a region can be several days or weeks (i.e. it is comparable to durations given by some implementations of the SDP model.

However, these equations are not able to take into account properly the presence of metastable zones in a medium. So, and it is unsurprising that the solutions of above equations, which can describe the wave explosive instability during three-waves interaction, were not considered. In this work we proceed from the general physical model of wave explosive instability [Ryskin, Trubetskov, 2017]. In the simplest case of a spatially homogeneous medium, the system of equations for amplitudes of three interacting waves a_1, a_2, a_3 is written in the form:

$$da_1/dt = A\, a_2\, a_3 \cos\varphi,\ da_2/dt = A\, a_1\, a_2 \cos\varphi,$$
$$da_3/dt = A\, a_2\, a_3 \cos\varphi,$$
$$d\varphi/dt = -(a_1\, a_2/a_3 + a_2\, a_3/a_1 + a_1\, a_3/a_2) \sin\varphi\,,$$
$$\varphi = \varphi_3 - \varphi_2 - \varphi_1, \qquad (10)$$

where A – time scale factor, φ_1, φ_2, φ_3 – wave phases. Phases signs in expression (10) correspond to the waves numbering: 1, 2 – negative energy waves, 3 – positive energy wave. The system of equations (10) is significantly simplified, if wave amplitudes are the same at the initial time moment. Then, as it can be seen from (10), the amplitudes will be the same in the subsequent time: $a_1 = a_2 = a_3 = a$, and a system of two equations can be written instead of (10):

$$da/dt = A\, a^2 \cos\varphi,\ d\varphi/dt = -3A\, a \sin\varphi. \qquad (11)$$

According to (11), amplitude a increases when $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$, and decreases when $|\varphi| > \pi/2$. There is an integral of motion (conserved quantity) for equations (11):

$$a^3 \sin\varphi = \text{const} = a_0^{\,3} \sin\varphi_0. \qquad (12)$$

If the initial phase $\varphi_0 = 0$, then equations for an amplitude is reduced to the form $da/dt = A\, a^2$, and its solution coincides with expression (3), where the substitution $\alpha = 2$ is necessary. Changing the notation $y \to a$, $A_0 \to A$ in (4), one can obtain easily an expression for the time, during which the growing solution exists $t_S = 1/Aa_0$.

For a nonzero initial phase φ_0, excluding $\cos\varphi$ in the amplitude equation (11) with the aids of formulae $\cos\varphi = \pm(1 - \sin^2\varphi)^{1/2}$, $\sin\varphi = a_0^{\,3} \sin\varphi_0/a^3$, one can become the following first-order equation:

$$da^2/dt = \pm 2\, A\, (a^6 - a_0^6 \sin^2\varphi_0)^{1/2}. \qquad (13)$$

Equation (13) is similar in form to equation (1) for y parameter. Squared wave amplitude is proportional to its energy, and wave energy is de-

termined for wave flow passing through a certain area in a unit time. This implies that the y parameter from equation (1) has a physical essence of the energy release per unit time.

Comparison of this parameter with the seismic activity can be justified, when the samples of events in a narrow magnitude range are considered. But this is the way of the foreshock cascades analysis in the works [Tikhonov et al., 2017; Tikhonov, Kim, 2010; Tikhonov, Rodkin, 2012; etc.], devoted to the prediction of earthquake origin time based on the SDP model.

Equation (13) permits a solution in quadratures. It is convenient to introduce a new variable to write this solution:

$$\xi = a^2/(a_0^2 \sin^2\varphi_0^3). \qquad (14)$$

After changing the variable in (13), we obtained the following equation:

$$(\xi^3-1)^{-1/2}\, d\xi/dt = 2Aa_0\sin^{1/3}\varphi_0 \qquad (15)$$

Solution of which with the initial condition $\xi(0) = \xi_0 = \sin^{2/3}\phi_0$, $0 < \varphi_0 \le \pi/2$ can be written in a form

$$t = 1/(2\,A\,a_0 \sin^{1/3}\varphi_0) \int_{\xi_0}^{\xi} dz/(z^3-1)^{1/2} \qquad (16)$$

Integral in (16) is expressed in terms of a special function – normal elliptic integral of the first kind $F(\Psi, k)$ [Prudnikov et al., 1984]:

$$t = (2\,A\,a_0 \sin^{1/3}\varphi_0)^{-1}\,[F(\Psi_0,k) - F(\Psi,k)]\,/\sqrt[4]{3}, \qquad (17)$$

where $k = \sin \pi/12 \approx 0.2588$,

$$\cos\Psi_0 = \frac{1-(\sqrt{3}+1)\sin^{2/3}\varphi_0}{1+(\sqrt{3}-1)\sin^{2/3}\varphi_0}, \qquad (18)$$

$$\cos\Psi = \frac{a^2/a_0^2-(\sqrt{3}+1)\sin^{2/3}\varphi_0}{a^2/a_0^2+(\sqrt{3}-1)\sin^{2/3}\varphi_0},$$

but due to the awkwardness of a record (17) and (18), the quadrature expression will be more convenient for numerical estimates. In particular, the time of amplitude rise to infinity can be expressed in terms of a function of the initial phase φ_0: $t_S = J(\varphi_0)/(Aa_0)$. For a special case, when $\varphi_0 = 0$, the function $J = 1$, and for nonzero φ_0 from the interval $0 < \varphi_0 \le \pi/2$ the function $J(\phi_0)$ is determined by expression

$$J(\varphi_0) = 1/(2\,\sin^{1/3}\varphi_0) \int_{\xi_0}^{\infty} dz/(z^3-1)^{1/2}, \qquad (19)$$

$$\xi_0 = 1/\sin^{2/3}\varphi_0 > 1.$$

For the interval $\pi/2 < \varphi_0 < \pi$, where an amplitude decreases, and phase rises in time, the values of $J(\varphi_0)$ are determined by expression (the intermediate steps are omitted):

$$J(\varphi_0) = 2\,J(\pi/2) - J(\pi - \varphi_0). \qquad (20)$$

The case $\varphi_0 = \pi/2$ is the most interesting, when at initial time moment $da/dt = 0$, and equation (13) can simulate transition from quasi-stationary to blow-up regime. In such instance, $J(\pi/2) = 1.214$, that differs from the special case $\varphi_0 = 0$ approximately by 20 %. Since the lifetime of growing solutions of equations (13) or (15) is $t_S = J(\varphi_0)/(Aa_0)$, then t_S also changes by nearly 20 % only when initial phase changes from 0 to $\pi/2$. This result can be used when analyzing the foreshock sequences to search for blow-up regimes. The problem of selection of three undefined factors A, a_0, φ_0 arises when comparing the empirical data with equation (13). The trial selection of initial phase $\varphi_0 = \pi/2$ seems to be reasonable for the chosen interval with initial point prior to rapid activity growth (at quasi-stationary regime). Then, one can specify the values of A, a_0 that will provide the best similarity to solution (13) rather than solution of equation (1). This is a way to obtain a clear assessment of time t_S, which is used for prediction.

Discussion and conclusion

In conclusion, it is worth noting the special feature of wave explosive instability in the medium with non-homogeneity – the presence of amplitude threshold of negative energy wave [Rabinovich et al., 1974; Zakharov, Manakov, 1975; Bers et al., 1976]. According to these and other works the waves localization on non-homogeneity, and their amplitude growth take place only when the initial amplitude of negative energy wave is high enough (powerful energy income). When the initial amplitude is below the threshold, the released

Turn to the values of the function $J(\varphi_0)$ for some values of the initial phase.

j	0	p/12	p/6	p/4	p/3	5p/12	p/2	7p/12	2p/3	3p/4	5p/6	11p/12	π
$J(\varphi_0)$	1	1.005	1.020	1.046	1.085	1.140	1.214	1.289	1.344	1.383	1.409	1.424	2.429

energy is transferred away from non-homogeneity zone, and the so-called convective instability takes place [Trubetskov, Rozhnev, 2001]. Applying these results to the case of foreshock sequences (SDP), one can assume, that there is an additional condition under which the SDP solutions, revealed by means of A.I. Malyshev's algorithm, provide a precursor of earthquake. This condition is reduced to the presence of events with enlarged magnitude in the beginning of subsequence obeying the SDP equations (1) or (2). This assumption allows validation by the existing examples of the SDP solutions [Zakupin et al., 2019], and, more importantly, by using the new data on seismic activation prior to the stationary mainshock. After its validation the assumption concerning an additional "filter" of the SDP solutions is able to explain the difference between estimates by the SDP and AMR methods. In some works (the references are given above), the SDP or AMR methods are considered effective or at least acceptable for predicting the time of an earthquake, while in others [Vere-Jones, 2001; Hardebeck et al., 2008] they are supposed to be statistically not justified.

The increase in seismic activity before the mainshock, described by the SDP model, can be a manifestation (i.e. it follows someth.) of the processes of different origin. The examples of such physical processes are considered above: the accumulation of seismogenic faults and the development of explosive instability. The SDP model can be considered a physical rather than phenomenological model, although it is similar to the concept of self-organization, which involves the blow-up regime occurrence. Nevertheless, the SDP model is actually oversimplified. When applying this model for different seismically hazardous regions, So, the resulted efficiency of earthquake time predictions of the time of an earthquake (the percentage of successful predictions to the total number of earthquakes with a magnitude not lower than that of the "predicted" ones) can vary significantly. The southern part of Sakhalin Island gave peculiar, but very interesting precedent that efficiency of SDP model is high enough. Indeed, in a relatively short time, less than 20 years, I.N. Tikhonov, A.I. Malyshev and A.S. Zakupin have provided 6 successful forecasts, including an early prediction for the August 2, 2007 M = 6.2 Nevelsk earthquake. The number of false alarms and missed targets for the same period is no more than 3. But the magnitude of all predicted events was less than 6.5.

The effectiveness of the SDP model for predictions of major earthquakes in the Far East region of Russia has to be tested. Therefore, the new approach to use the SDP model to estimate the seismic hazard proposed by the Malyshevs in their paper (work) is highly relevant. The information about events from the interval with increasing activity (precedents) is used in this work to refine the estimates of the mainshock origin time, and these estimates are called precedent-extrapolative. It is also promising to improve the model itself (expanding the class of equations describing the foreshock sequences, introducing additional parameters into the SDP model) aimed to detect the very beginning of an "explosive" increase in the activity before the mainshock.

References

1. Bers A., Kaup D.J., Reiman A.H. **1976.** Nonlinear interaction of three wave packets in a homogeneous medium. *Physical Review Letters*, 37(4): 182–185. https://doi.org/10.1103/physrevlett.37.182

2. Bowman D.D., Ouillon G., Sammis C.G., Sornette A., Sornette D. **1998.** An observational test of the critical earthquake concept. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10): 24359–24372. https://doi.org/10.1029/98jb00792

3. Bykov V.G. **2005.** Strain waves in the Earth: theory, field data, and models. *Russian Geology and Geophysics*, 46(11): 1176–1190. (In Russ.).

4. Bykov V.G. **2018.** Prediction and observation of strain waves in the Earth. *Geodynamics & Tectonophysics*, 9(3): 721–754. (In Russ.).

5. Cianchini G., De Santis Ang., Giovambattista R.D., Abbattista C., Amoruso L., Campuzano S.A., Carbone M., Cesaroni C., De Santis Anna, Marchetti D. et al. **2020.** Revised accelerated moment release under test: Fourteen worldwide real case studies in 2014–2018 and simulations. *Pure and Applied Geophysics*, 177: 4057–4087. https://doi.org/10.1007/s00024-020-02461-9

6. Das S., Scholz C. H. **1981.** Theory of time-dependent rupture in the Earth. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 86: 6039–6051. https://doi.org/10.1029/jb086ib07p06039

7. Debate on evaluation of the VAN Method: Editor's introduction. **1996.** *Geophysical Research Letters*, 23(11): 1291–1293. https://doi.org/10.1029/96gl00742

8. Geller R. **1997.** Earthquake prediction: critical review. *Gephysical J. International*, 131(3): 425–450. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1997.tb06588.x

9. Hardebeck J.L., Felzer K.R., Michael A.J. **2008.** Improved tests reveal that the accelerating moment release hypothesis is statistically insignificant. *J. of Geophysical Research*, 113(B08310). doi:10.1029/2007JB005410

10. Jaumé S., Sykes L. **1999.** Evolving towards a critical point: A review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquakes. *Pure and Appl. Geophysics*, 155: 279–305. https://doi.org/10.1007/s000240050266

11. Kharakhinov V.V., Gal'tsev-Bezyuk S.D., Tereshchenkov A.A. **1984.** [Sakhalin faults]. *Tikhookeanskaya geologiya = Geology of the Pacific Ocean*, 2: 77–86. (In Russ.).

12. Kuksenko V.S. **1986.** [Transition model from micro- to macro-destruction of the solids]. In: (Ed. S.N. Zhurkov) *Fizika prochnosti i plastichnosti* [*Physics of strength and plasticity*]. Leningrad: Nauka, p. 36–41.

13. Malinetskiy G.G., Potapov A.B. **2002.** [*Modern problems of nonlinear dynamics*]. 2 ed., revised and enlarged. Moscow: Editorial URSS, 358 p.

14. Malyshev A.I. **1991.** Dynamics of self-developing processes. *Volcanology & Seismology*, 4: 61–72. (In Russ.).

15. Malyshev A.I., **2019**. The predictability of the seismicity and large earthquakes: Kamchatka 1962 to 2014. *J. of Volcanology and Seismology*, 13: 42–55.

16. Malyshev A.I. **2020.** Predictability of the seismic energy flux: Southern Europe and the Mediterranean. *J. of Volcanology and Seismology*, 14(1): 30–43.

17. Malyshev A.I., Malysheva L.K. **2018.** Predictability of seismic energy rate in northwest frame of Pacific Ocean on the base of USGS catalogue. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 141–153. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.141-153

18. Malyshev A.I., Tikhonov I.N. **1991.** [Regularities of the dynamics of the foreshock and aftershock sequences in the region of South Kuril Islands]. *Doklady AN USSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 319(1): 134–137. (In Russ.).

19. Malyshev A.I., Tikhonov I.N. **2007.** Nonlinear regular features in the development of the seismic process in time. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 43(6): 476–489.

20. Myachkin V.I., Kostrov B.V., Sobolev G.A., Shamina O.G. **1975.** [Fundamentals of the source physics and earthquakes precursors]. In: *Fizika ochaga zemletryaseniya* [*Physics of earthquake source*]. Moscow: Nauka, p. 6–29.

21. Nikolaevsky V.N. **1996.** *Geomechanics and fluid dynamics*. Moscow: Nedra, 447 p.

22. Ostrovskiy L.A., Rybak S.A., Tsimring L.Sh. **1986.** Negative energy waves in hydrodynamics. *Soviet Physics Uspekhi*, 29(11): 1040–1052. https://doi.org/10.1070/pu1986v029n11abeh003538

23. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. **1984.** *Integraly i ryady* [*Integrals and series*]. Moscow: Nauka, 800 p.

24. Rabinovich M.I., Reutov V.P., Tsvetkov A.A. Coalescence of wave pulses or beams in explosive instability. *Soviet Physics – JETP*, 40(2): 260–263. URL: http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_040_02_0260.pdf

25. Ryskin N.M., Trubetskov D.I. **2017.** [*Nonlinear waves*]. Moscow: LENARD, 312 p.

26. Sobolev G.A., Zav'yalov A.D. **1980.** [On the concentration criterion of seismogenic ruptures]. *Doklady AN USSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 252 (1): 69–71. (In Russ.).

27. Tikhonov I.N., Mikhaylov V.I., Malyshev A.I. **2017.** Modeling the Southern Sakhalin earthquake sequences preceding strong shocks for short-term prediction of their origin time. *Russian J. of Pacific Geology*, 11(1): 1–10. https://doi.org/10.1134/s1819714017010092

28. Trubetskov D.I., Rozhnev A.G. **2001.** [*Linear oscillations and waves*]. M.: Fizmatlit, 416 p.

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

30. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. **2012(2011).** The current state of art in earthquake prediction, the typical precursors, and the experience in the earthquake forecasting at the Sakhalin Island and the surrounding areas. In: (Ed. Sebastiano D'Amico) *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*. Book 5, p. 43–79. doi:10.5772/28689

31. Varnes D.J. **1989.** Predicting earthquakes by analyzing accelerating precursory seismic activity. *Pure and Applied Geophysics*, 130(4): 661–686. https://doi.org/10.1007/bf00881603

32. Vere-Jones D., Robinson R., Yang W. **2001.** Remarks on the accelerated moment release model: problems of model formulation, simulation and estimation. *Geophysical J. International*, 144: 517–531. https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2001.01348.x

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

34. Voight B. **1989.** A relation to describe rate-dependent material failure. *Science*, 243(4888): 200–203. https://doi.org/10.1126/science.243.4888.200

35. Volegov P.S., Gribov D.S., Trusov P.V. **2017(2015).** Damage and fracture: classical continuum theories. *Physical mesomechanics*, 20(2): 157–173. https://doi.org/10.1134/s1029959917020060

36. Zakharov V.E., Manakov S.V. **1976(1975).** The theory of resonance interaction of wave packets in nonlinear media. *Soviet Physics – JETP*, 42(5): 842–850. URL: http://jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_042_05_0842.pdf

37. Zakupin A.S., Boginskaya N.V., Andreeva M.Yu. **2019.** Methodological aspects of the study of seismic sequences by SDP (self-developing processes) on the example of the Nevelsk earthquake on Sakhalin. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 377–389. (In Russ, abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389

38. Zavyalov A.D. **2005.** From the kinetic theory of strength and fracture concentration criterion to the seismogenic fracture density and earthquake forecasting. *Physics of the Solid State*, 47(6): 1034–1041. https://doi.org/10.1134/1.1946852

Об авторах

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

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

About the Authors

Bogomolov Leonid Mikhailovich (ORCID 0000-0002-9124-9797), Doctor of Physics and Mathematics, Director of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, bleom@mail.ru

SYCHEV Vladimir Nikolaevich (ORCID 0000-0001-7508-9087), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Research Station RAS in Bishkek, Kyrgyzstan, sychev@gdirc.ru

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

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

УДК 551.248.2+550.341

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.153-166

Изучение трещинных коллекторов при проведении геологоразведочных работ в северо-восточной части о. Сахалин

© 2021 *Ю. В. Костров*[*1], *В. А. Дегтярев*[1,2], *А. В. Маринин*[3], *Э. К. Хмарин*[1], *П. А. Каменев*[2]

[1]*ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», Южно-Сахалинск, Россия*
[2]*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия*
[3]*Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия*
**E-mail: yvkostrov@snipi.rosneft.ru*

Резюме. В рамках полевых экспедиций на северо-востоке о. Сахалин с целью изучения кремнистых отложений пильской свиты для разработки методики локализации залежей нефти в нетрадиционных трещинных коллекторах изучены естественные обнажения кайнозойских отложений на п-ове Шмидта и в Пограничном прогибе. Отобраны образцы для аналитических исследований (геомеханических, геохимических, литологических и т.п.), изучены малые структурные формы (складки, разрывные нарушения зеркала скольжения, отрывы, сколовые трещины), являющиеся индикаторами тектонических деформаций массива горных пород. Показано, что интенсивность трещиноватости сильно зависит от литологии, положения точки наблюдения относительно дизъюнктивных и/или пликативных структур. Направление трещин меняется в зависимости от положения относительно элементов локальных складок и от положения блока (при мелкоблочном строении). По результатам полевых наблюдений, зона интенсивных дислокаций имеет крайне незначительную мощность – как правило, первые десятки метров. Отмечена резкая неоднородность поля напряжения в окрестности Пограничного прогиба, отраженная в характере элементов залеганий, структурных нарушений и парагенезов. В северной части прогиба выделены многочисленные дебитующие нефтепроявления, связанные с открытой трещиноватостью, которая, очевидно, свидетельствует о продолжающемся до настоящего времени режиме растяжения.

Ключевые слова: нетрадиционные коллекторы, кремнистые отложения, тектонические напряжения, деформации, борозды скольжения, трещиноватость, геологоразведочные работы, остров Сахалин

Study of fractured reservoirs during geological exploration in the north-eastern part of the Sakhalin Island

Yurii V. Kostrov[*1], *Vladislav A. Degtyarev*[1,2], *Anton V. Marinin*[3], *Eduard K. Khmarin*[1], *Pavel A. Kamenev*[2]

[1]*LLC "RN-SakhalinNIPImorneft", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*
[2]*Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*
[3]*Schmidt Institute of Earth Physics, RAS, Moscow, Russia*
**E-mail: yvkostrov@snipi.rosneft.ru*

Abstract. During a geological fieldworks in the northeast of Sakhalin Island in order to study the siliceous deposits of the Pilskaya formation and to develop a technique for locating oil deposits in unconventional fractured reservoirs, natural outcrops of Cenozoic deposits on the Schmidt Peninsula and in the Pogranichny depression were studied. Samples were taken for analytical studies (geomechanical, geochemical, lithological, etc.), structural forms (folds, minor faults, slickensides, tension gashes, joints, shear fractures), which are indicators of tectonic deformations of the rock massive, were studied. It is shown that the intensity of fracturing strongly depends on the lithology, the position of the observation point relative to disjunctive and/or plicative structures. The direction of the joints varies depending on the position relative to the elements of the local folds and on the position of the block (with a small-block structure). According to the

results of field observations it is shown, that the zone of intense dislocations has an extremely insignificant thickness usually the first tens of meters. An extremely nonuniformity of the stress field in the vicinity of the Pogranichniy depression is noted, which is reflected in the nature of the dipping planes, structural patterns and parageneses. In the northern part of the syncline, numerous flowing oil shows associated with open fracturing are identified, which obviously indicates the extension regime that continues up to this day.

Keywords: unconventional reservoirs, siliceous deposits, tectonic stress, deformations, slickensides, fracturing, geological fieldwork, Sakhalin Island

Для цитирования: Костров Ю.В., Дегтярев В.А., Маринин А.В., Хмарин Э.К., Каменев П.А. Изучение трещинных коллекторов при проведении геологоразведочных работ в северо-восточной части о. Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 2, с. 153–166. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.153-166

For citation: Kostrov Yu.V., Degtyarev V.A., Marinin A.V., Khmarin E.K., Kamenev P.A. Study of fractured reservoirs during geological exploration in the north-eastern part of the Sakhalin Island. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, vol. 5, no. 2, pp. 153–166. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.153-166.

Благодарности

Выражаем благодарность сотрудникам центрального аппарата управления компании ПАО «НК «Роснефть» А.В. Мирошниченко, А.А. Пашали, К.В. Торопову, И.А. Середе, без участия которых данная работа была бы невозможна. А также сотрудникам лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики ИФЗ РАН – Н.А. Гордееву, И.В. Бондарю, Ю.Л. Ребецкому, Л.А. Сим, внесшим весомый вклад в проведение экспедиции, обработку и интерпретацию полученных данных.

Acknowledgements

We are grateful to the staff of central management office of the PJSC OC Rosneft A.V. Miroshnichenko, A.A. Pashali, K.V. Toropov, I.A. Sereda, without of whose participation this work would have been impossible. And, also, to the staff of the laboratory of fundamental and applied problems tectonophysics IPE RAS – N.A. Gordeev, I.V. Bondar, Yu.L. Rebetsky, L.A. Sim, who made a significant contribution to the fieldwork, processing and interpretation of the data obtained.

Введение

В настоящее время в связи с исчерпанием фонда крупных месторождений нефти и газа с традиционным (поровым) типом коллектора все большее значение приобретают залежи с так называемым нетрадиционным коллектором. К таким коллекторам относят, в частности, трещинные коллекторы кремнистых пород с практически нулевой матричной проницаемостью, где определяющим фактором качества коллектора является его трещиноватость. Для эффективного прогноза распространения зон трещиноватости при проведении геологоразведочных работ и проектировании гидроразрыва пласта необходимо изучение закономерностей распределения напряжений и связанной с ними исходной трещиноватости района исследований [Gale et al., 2014; Wang, 2019]. На сегодняшний день не существует единой оптимальной методики такого прогноза. Тем не менее как отечественными, так и зарубежными специалистами предпринимаются попытки обобщения теоретической, лабораторной и полевой информации [Жиров, 2019; Опарин и др., 2015; Llanos et al., 2017].

В 2020 г. на п-ове Шмидта и в Пограничном прогибе о. Сахалин (рис. 1) проектным институтом компании Роснефть ООО «РН-СахалинНИПИморнефть» совместно с Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) и Институтом морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН) проведены полевые экспедиции с целью изучения кремнистых отложений пильской и пиленгской свит для разработки методики локализации залежей нефти в трещинных коллекторах [Каменев и др., 2021]. В задачи исследования входило: изучение естественных обнажений кайнозойских отложений и отбор образцов для аналитических исследований (геомеханических, геохимических, литологических), изучение малых структурных форм (складки, разрывные нарушения, зеркала скольжения, отрывы, сколовые трещины), являющихся индикаторами тектонических деформаций массива горных пород; затем построение диаграмм трещиноватости на основе методов структурной геологии и тектонофизики, реконструкция напряженно-деформированного состояния.

Общие первичные результаты экспедиции на п-ове Шмидта – характеристика и геологическое строение района исследований, методические принципы отбора проб для геомеханических, геохимических, литологических, а также тектонофизических исследований опубликованы в работе [Каменев и др., 2021]. В настоящей статье основное внимание уде-

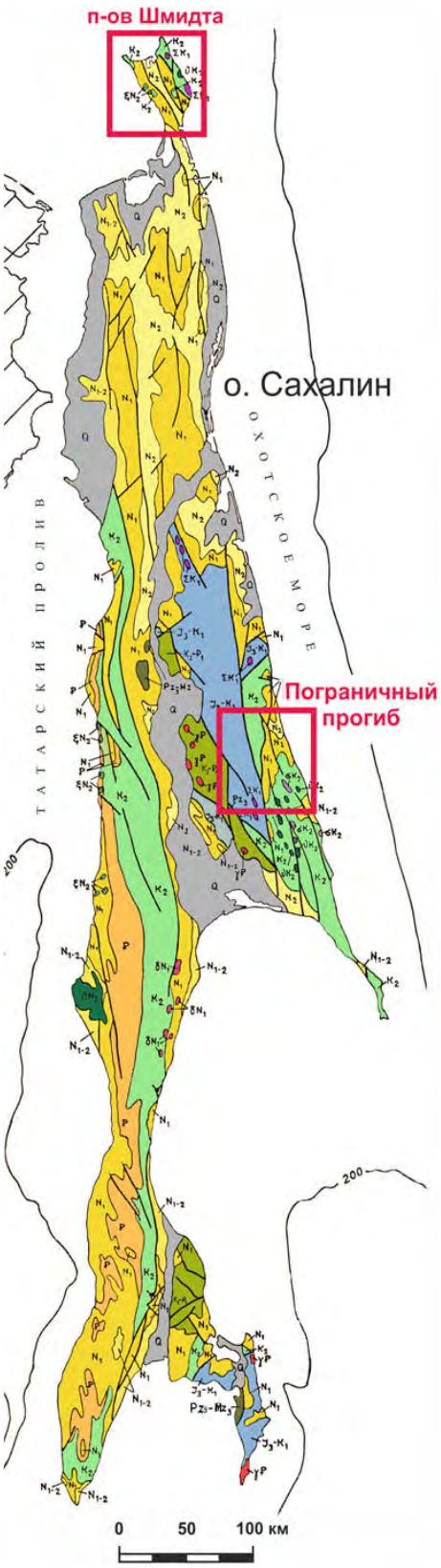


Рис. 1. Обзорная схема о. Сахалин с выделенными районами исследования (по: [Геология СССР, 1970]).

Figure 1. Overview scheme of Sakhalin Island with highlighted study areas according to [Geology of the USSR, 1970].

лено региональной геодинамике и структурной геологии п-ова Шмидта и Пограничного прогиба по результатам двух экспедиций.

Методики и результаты

Сахалин расположен в зоне сдвигового взаимодействия крупных литосферных плит – Амурской и Охотоморской. Между этими плитами с конца мезозоя и до настоящего времени развивается зона широкого сложного сдвигания толщ и формируется система сближенных глубинных сдвигов [Сим и др., 2017]. Тектоническое строение континентальных окраин, к которым относится о. Сахалин, крайне сложное. Остров в упрощенном виде представляет собой горст, находящийся в зоне коллизии между Амурской и Тихоокеанской плитами (рис. 2). И в этом плане имеют

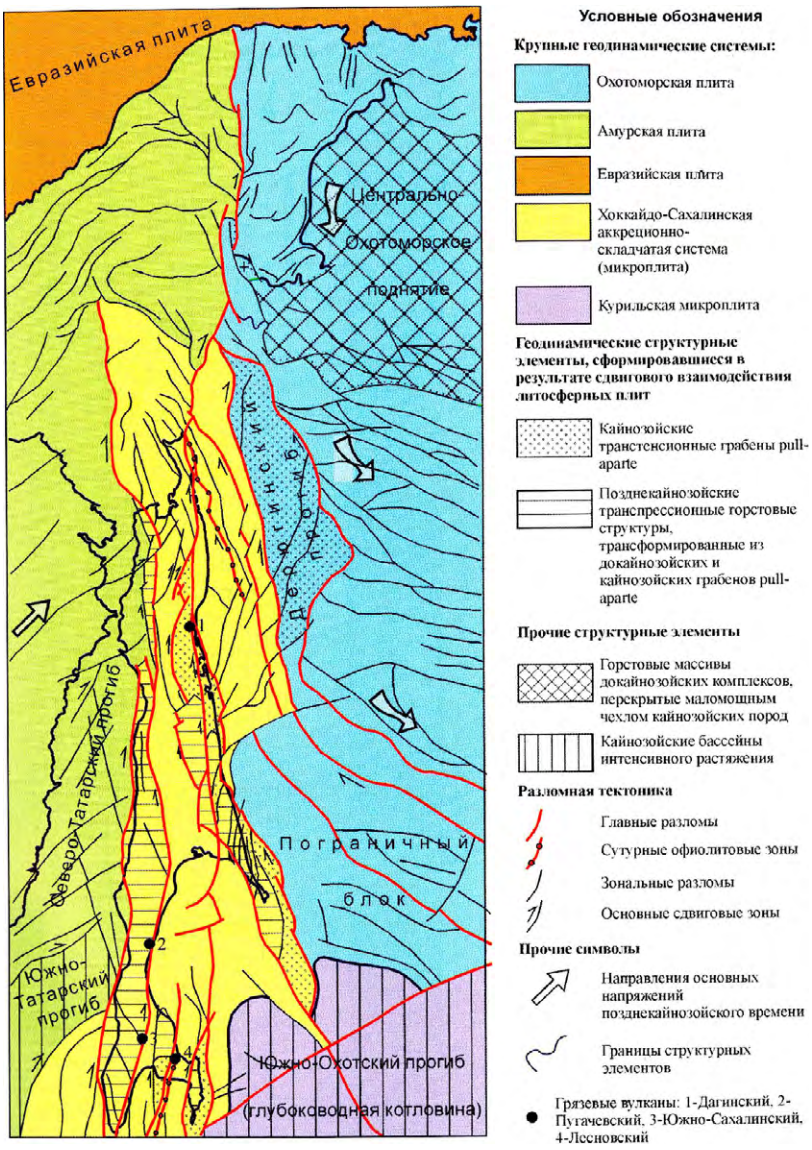


Рис. 2. Карта кайнозойской геодинамики западной части Охотоморья согласно [Харахинов, 2010].

Figure 2. Map of the Cenozoic geodynamics of the western part of the Sea of Okhotsk region according to [Kharakhinov, 2010].

значение некоторые особенности. Во-первых, периоды сжатия сменяются периодами растяжения. Во-вторых, так как взаимодействие вышеуказанных плит происходит не перпендикулярно, а под острым углом, характер деформаций горных пород крайне неравномерен и неоднороден [Polets, 2019; Heidbach et al., 2018]. В-третьих – наиболее интенсивной является более молодая Сахалинская фаза тектонической активации.

Поверхность мезозойского фундамента Сахалина представлена породами различного возраста, генезиса и состава: верхнеюрскими яшмоидами, кремнисто-глинистыми сланцами, вулканогенно-кремнистыми, основными и ультраосновными изверженными породами; нижнемеловыми сильно литифицированными вулканогенно-осадочными породами; верхнемеловыми, преимущественно морскими аргиллитами и алевролитами [Экосистемы кайнозоя… , 1999].

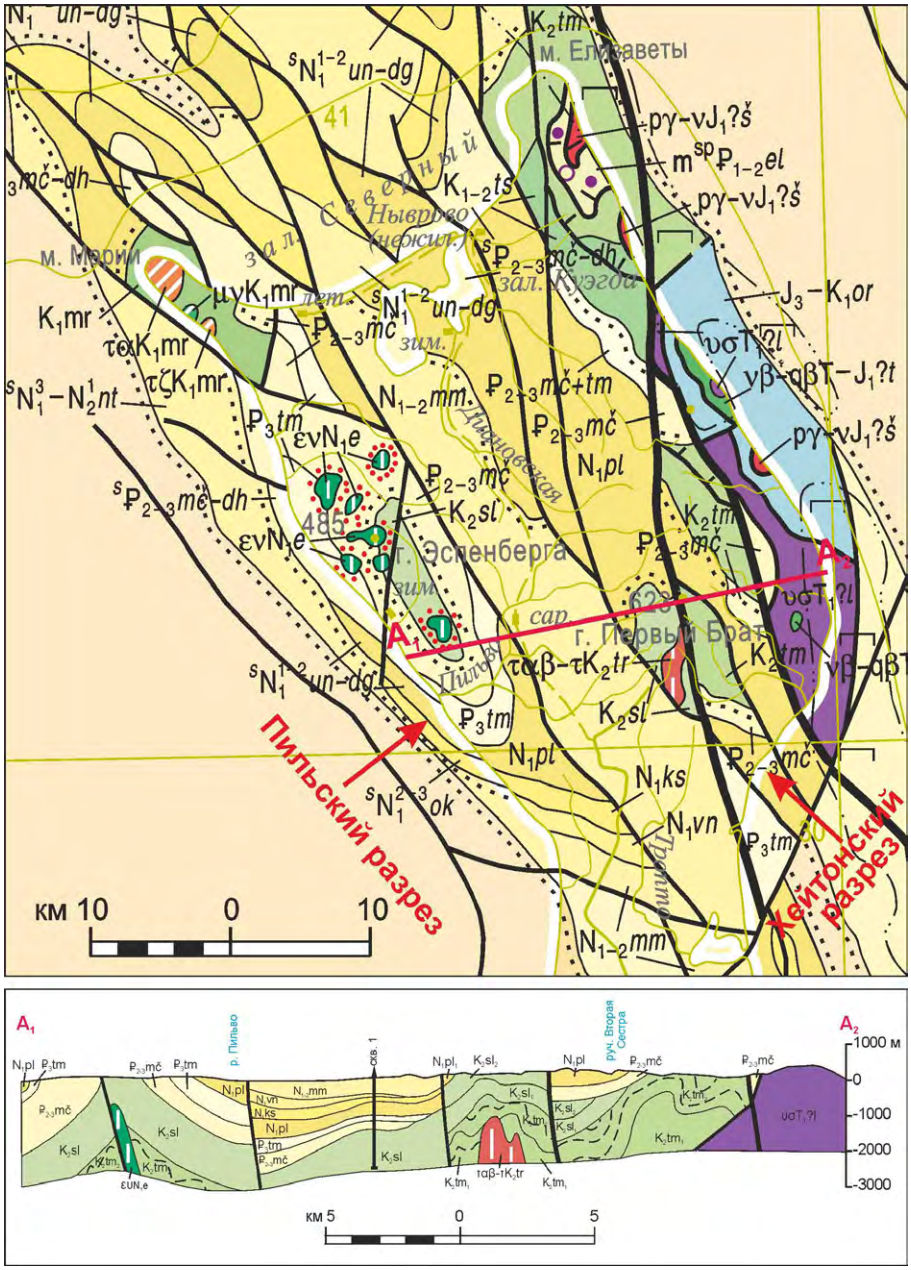


Рис. 3. Фрагмент геологической карты п-ова Шмидта м-ба 1 : 1000 000[1]. Геологический разрез по линии A_1 – A_2.

Figure 3. Fragment of the geological map of the Schmidt Peninsula on scale 1 : 1000 000[1]. Geological cross-section along the line A_1 – A_2.

Кайнозойский чехол имеет значительную мощность (более 10 км на шельфе) толщи вулканогенно-осадочных и осадочных пород морского и прибрежно-терригенного генезиса [Гладенков и др., 2002]. В районе п-ова Шмидта весь кайнозойский разрез представлен кремнистыми и кремнийсодержащими породами с уменьшением содержания кремнезема от олигоценовых перекристаллизованных опок тумской свиты ($₽_3tm$) до диатомитов верхнемиоцен-плиоценовой маямрафской свиты ($N_{1-2}mm$) и терригенных лигнитоносных отложений верхнеплиоценовой помырской свиты (N_2pm) (рис. 3) [Коноваленко и др., 2009].

Для восточного побережья п-ова Шмидта главными разрывными структура-

[1] Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. 2016. Третье поколение. Серия Дальневосточная. Лист M-54 (Александровск-Сахалинский). СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. URL: https://www.vsegei.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/Dalnevostochnaya/m-54.php
[State geological map of Russian Federation on a scale 1:1 000 000. 2016. Third generation. Far East series. Sheet M-54 (Aleksandrovsk-Sakhalinskiy)]. Saint Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI.

ми района исследования являются Хейтонский и Лонгрийский разломы, которые, по данным [Кожурин и др., 2009], имеют правосдвиговую кинематику на современном этапе. Ранее В.С. Рождественским [1975] общая правосдвиговая амплитуда смещений по меловым отложениям оценивалась в 10–15 км. Но не исключались и левосдвиговые смещения. Хейтонский и Лонгрийский разломы расположены на северном окончании (продолжении) Хоккайдо-Сахалинской системы разломов в целом меридионального простирания. Для собственно Хейтонского и Лонгрийского нарушений характерно ССЗ направление простирания. Активность их подтверждается выраженностью в рельефе и палеосейсмологическими данными [Кожурин и др., 2009]. Выявленные амплитуды правосдвиговых смещений составляют, по этим данным, около 10–15 км.

Центральный блок Хейтонского разреза расположен между Хейтонским и Лонгрийским разломами и разбит на три блока нарушениями второго порядка. Разрез представляет собой почти непрерывное естественное обнажение в береговом клифе длиной около 12 км от р. Бол. Лонгра до зал. Хейтон. Тонкослоистое строение пильской свиты, обусловленное тонкими глинистыми прослоями в кремнистых породах, и хорошая обнаженность позволили оценить распределение трещиноватости и зависимость ее интенсивности от литологии породы и положения относительно структурных элементов. Влияние региональных дизъюнктивных нарушений обусловили проявление очень интенсивных дислокаций в центральной части разреза.

В процессе полевых работ мы столкнулись с крайней неоднородностью строения пильской свиты, связанной на Хейтонском разрезе прежде всего с тектоническими деформациями. Например, в зоне разлома (рис. 4) висячее крыло очень интенсивно смято в мелкие складки и передробленo. Характер складчатости в висячем крыле свидетельствует о сильном сжатии: складки разнонаправленные, имеют небольшие размеры (до 1 м), крылья волнистые, слои пород в ядре зачастую расходятся, местами наблюдаются зоны дробления. Лежачее крыло имеет крутые углы падения, однако слои практически не нарушены и слабо трещиноваты.

Полевые наблюдения также показали, что зона интенсивных дислокаций имеет крайне незначительную мощность – как правило, первые десятки метров (рис. 5). В зоне вышеописанного разрывного нарушения можно наблюдать, что высокая интенсивность смятия и дробления распространяется на 16 м от разлома и затем резко снижается, амплитуда складок становится меньше, исчезают зоны дробления.

Еще одна особенность, подтвержденная полевыми наблюдениями: интенсивность трещиноватости зависит от положения точки наблюдения относительно структурных элементов складки. Например, наиболее интенсивная трещиноватость наблюдается в ядре складки, вдоль осевой поверхности. Здесь, в условиях сжатия, образуются мелкие, разнонаправленные, закрытые трещины, местами – локальные зоны дробления пород. В шарнире формируются веерообразно направленные открытые складки, частота которых уменьшается от оси складки к крыльям. Таким образом, от положения относительно структурных элементов складки сильно (до 180°) зависит преобладаю-

Рис. 4. Деформации пород в крыльях разлома. П-ов Шмидта, восточное побережье, Хейтонский разрез.

Figure 4. Rock deformation in the walls of a fault. Schmidt Peninsula, East coast, Kheyton cross-section.

щее направление трещин, интенсивность и характер трещиноватости (рис. 6).

На естественных обнажениях п-ова Шмидта были проведены массовые измерения элементов залегания плоскостей трещин, определена частота их встречаемости, установлены степень и характер заполнения, а также тип трещин. Затем собранные материалы были статистически обработаны, составлены диаграммы определенных систем трещин – розы-диаграммы азимутов падения, углов падения и азимутов простирания, стереограммы азимутов и углов падения трещин (рис. 7).

Еще одной задачей полевой экспедиции было изучение напряженного состояния горных пород по данным геологических индикаторов тектонических напряжений. Для этого проводились замеры зеркал скольжения и трещин с установленным характером смещений (здесь помимо элементов залегания плоскости разрыва измеряется еще направление ее относительной подвижки – угол скольжения). Для обработки полученных данных использовали метод катакластического анализа разрывных смещений (МКА) [Ребецкий, 2007] и созданную на его основе компьютерную программу STRESSgeol [Ребецкий и др., 2017]. МКА позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний: положение осей главных напряжений, тип напряженного состояния, коэффициент Лоде–Надаи, а также величины самих напряжений. Этот метод позволяет выделять трещины, формирующиеся в условиях активного дилатансионного расширения и в условиях компакции – объемного уплотнения. Метод основан на представлениях о квазипластическом деформировании геологической среды, установлении режима деформирования и максимуме диссипации внутренней

Рис. 5. Интенсивное смятие ослабленной части разреза в зоне разлома на Хейтонском разрезе п-ова Шмидта. Мощность зоны смятия 10–15 м.

Figure 5. Intensive deformation of the weakened part of the section in the fault zone at the Kheyton cross-section of the Schmidt Peninsula. The thickness of the shear zone is 10–15 m.

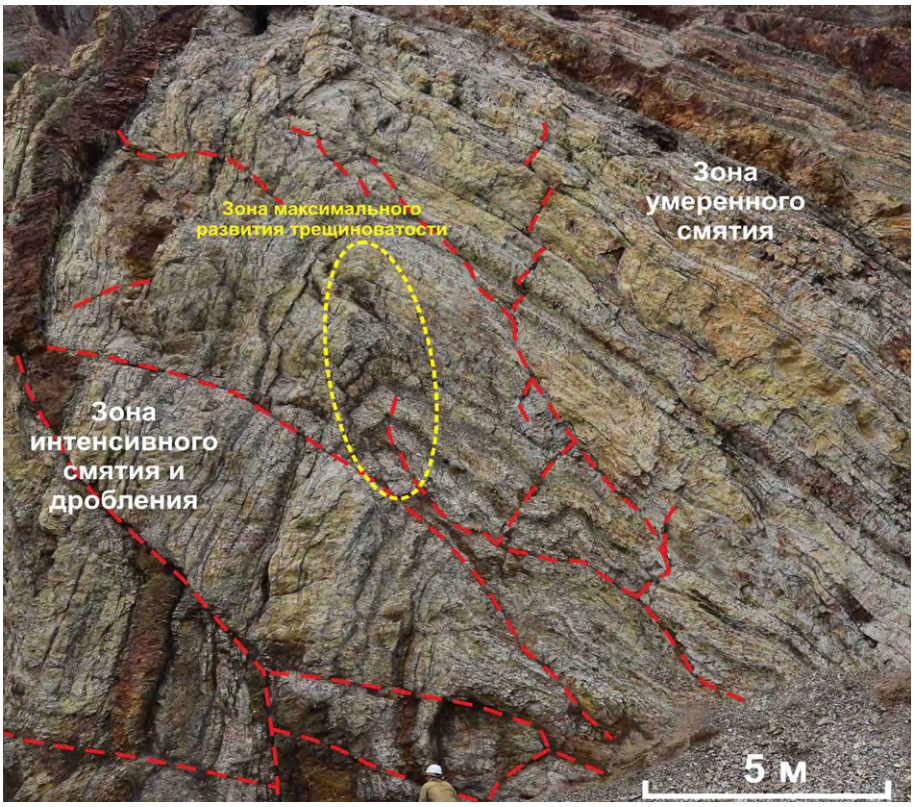


Рис. 6. Изменение интенсивности и направления трещиноватости в пределах локальной складки. Хейтонский разрез п-ова Шмидта.

Figure 6. Change in intensity and direction of fracturing within a local fold. The Kheyton cross-section of the Schmidt Peninsula.

упругой энергии для искомого тензора напряжений, положениях современной теории пластичности. Применяемая для расчетов программа STRESSgeol разделяет данные в каждой точке наблюдения на условные этапы квазиоднородного деформирования (если нет геологических сведений для предварительного разделения исходных выборок). Для разделения используется принцип достижения наибольшей суммарной энергии диссипации при минимальном количестве выделяемых фаз. Результаты проведенной тектонофизической инверсии напряжений для восточного побережья п-ова Шмидта представлены на рис. 8.

Структурно-парагенетический метод был применен для анализа систем тектонической трещиноватости разных кинематических типов с их объединением в устойчивые структурные ассоциации (парагенезы) [Расцветаев, 1987]. На восточном побережье п-ова Шмидта существенно больше различных зон дробления по сравнению с западным, что связано с более интенсивной тектонической нарушенностью и вероятным наличием дилатансионных зон (разуплотнения и трещиноватости). Здесь также можно отметить и наличие большего, чем на западном побережье, количества отрывных трещин (в том числе отрывов с минеральным выполнением). На суммарных диаграммах трещиноватости Хейтонского разреза хорошо обозначился максимум системы с СВ простиранием и крутым (вертикальным) падением. Другие максимумы связаны с СЗ простиранием двух систем с СВ и ЮЗ падениями (встречными) с углами падения около 70° (рис. 8).

В ходе исследований была проанализирована связь этих систем трещиноватости с ориентацией осей главных напряжений, полученных при реконструкции напряженно-деформированного состояния по данным о зеркалах скольжения. Изучаемый регион характеризуется напряженным состоянием с близширотной ориентацией осей наибольшего горизонтального сжатия. Реконструированные оси максимального сжатия для восточного побережья, помимо определений с субширотным направлением наибольшего горизонтального сжатия, содержат также много определений и с СВ ориентировкой.

Цель структурного анализа – изучение строения и структурной эволюции определенного сегмента земной коры, имеющего естественные пространственные ограничения [Кирмасов, 2011]. Таким сегментом может быть тектоническая зона, интрузивный массив, складка, зона дислокаций, сутура. В Пограничном прогибе мы наблюдали значительное разнообразие строения разреза, обусловленное комплексом тектонических, литологических и стратиграфических факторов.

Фундамент Пограничного бассейна сложен верхнемеловыми отложениями, они представлены стратифицированными толщами с мощными горизонтами олистостром и тектоногенными комплексами в виде линейных зон полимиктового меланжа, которые характеризуются сложным чешуйчато-надвиговым типом дислокаций [Тютрин, Дуничев, 1985]. Кайнозойские отложения относятся к эоценовой угленосной молассе (люкаминская свита), сменяющейся вверх по разрезу опоковой и кремнисто-глинистой формациями окраинного междугового бассейна,

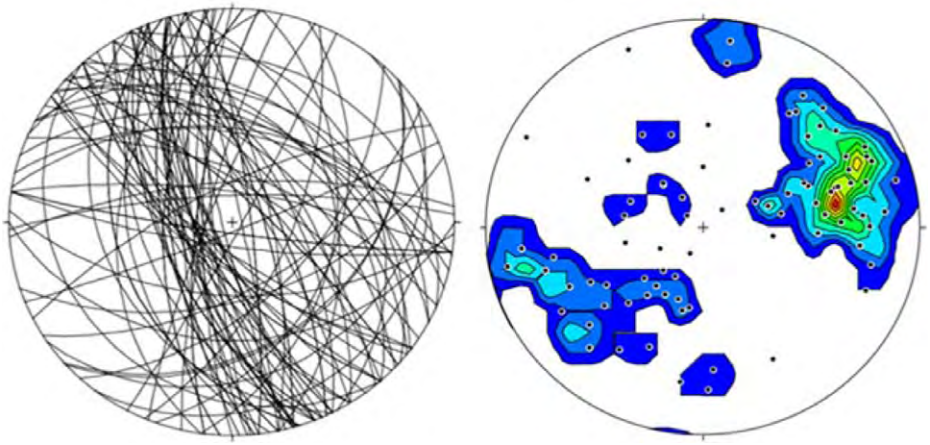


Рис. 7. Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы) проекций плоскостей (слева) и полюсов (справа) зон дробления восточного побережья п-ова Шмидта (Хейтонский разрез). Пример графических построений в программе StereoNET.

Figure 7. Circle diagrams (stereographic projection of the upper hemisphere) of the projections of planes (left) and poles (right) of the crushed zones of the east coast of the Schmidt Peninsula (Kheyton section). An example of graphical constructions in the StereoNET program.

пиленгской $Ꝑ_3pg$ и борской N_1br свит (рис. 9) [Дымович и др., 2016].

Указанные особенности строения Пограничного бассейна обусловили большие различия в силе, направлении и времени воздействия тектонических напряжений на различные блоки фундамента и осадочного чехла. Сила, направление и время воздействия напряжений сжатия и растяжения на различные блоки фундамента и осадочного чехла

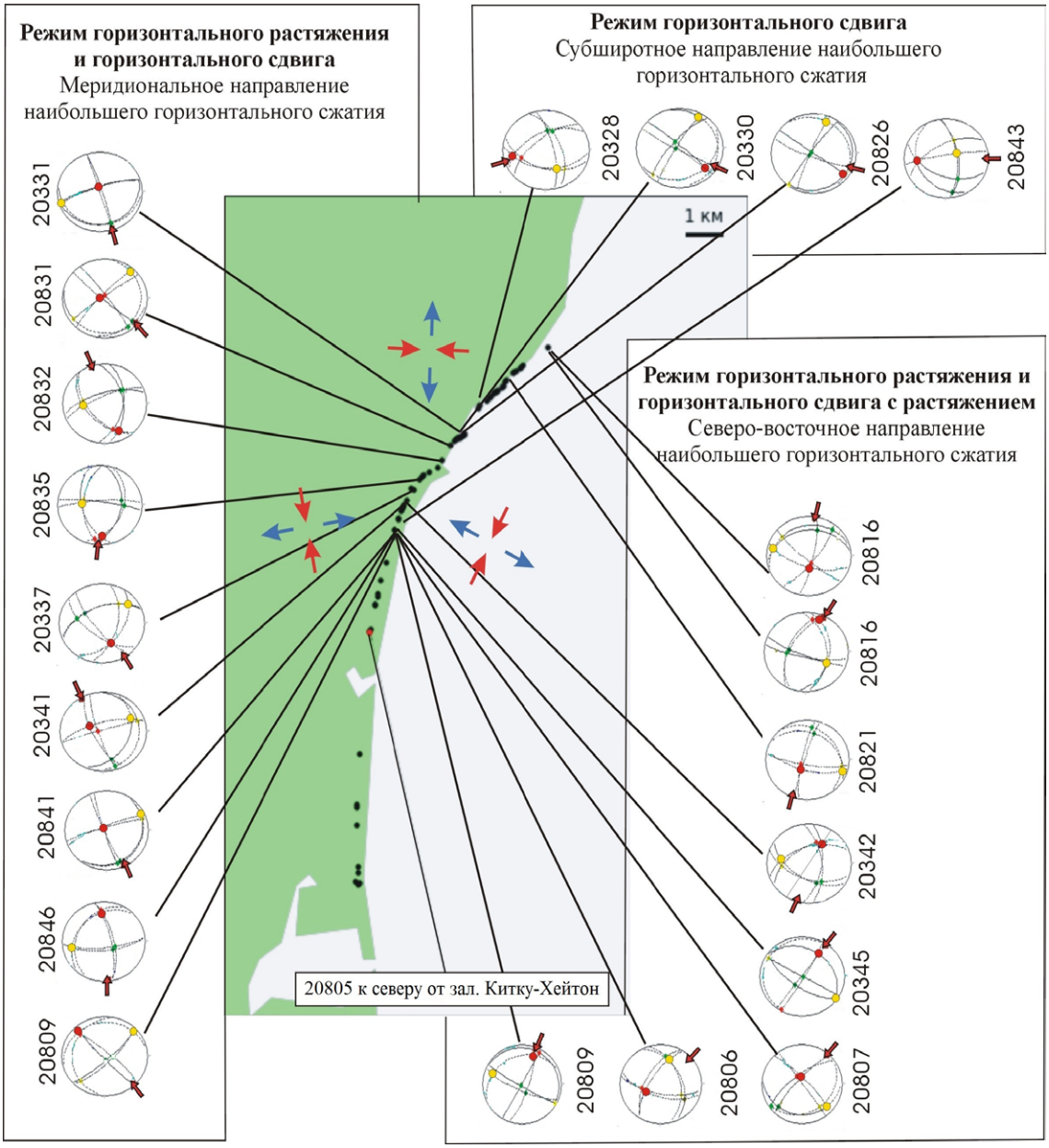


Рис. 8. Результаты тектонофизической инверсии напряжений для восточного побережья п-ова Шмидта. На карте: красными стрелками показаны оси максимального горизонтального сжатия, синими – минимального горизонтального сжатия (растяжения). На стереограммах (стереографическая проекция нижней полусферы): красный кружок – ось максимального сжатия, зеленый – промежуточная ось, желтый – ось минимального сжатия (девиаторного растяжения), красная стрелка – направление максимального горизонтального сжатия.

Figure 8. Results of tectonophysical stress inversion for the east coast of the Schmidt Peninsula. On the map: the red arrows show the axes of maximum horizontal compression, the blue ones show the axes of minimum horizontal compression (tension). On stereograms (stereographic projection of the lower hemisphere): red circle – the axis of maximum compression; green circle – the intermediate axis; yellow circle – the axis of minimum compression (deviatory extension); red arrow – the direction of maximum horizontal compression.

были различны. Поэтому в соседних блоках, даже небольших по размерам (первые сотни метров), элементы залегания, характер и интенсивность трещиноватости (рис. 10), а при значительных подвижках и литология нередко кардинально различаются. Это отражено, в частности, и в характере распределения поля напряжения в окрестности Пограничного прогиба. Если для напряженного состояния всего Сахалина наиболее характерен геодинамический режим субширотного сжатия [Heidbach et al., 2018], то в районе 50° с.ш., ближе к охотоморскому побережью, судя по механизмам очагов землетрясений [Коновалов и др., 2014], ориентации осей сжатия и растяжения радикально меняются. Ближе к центру острова наблюдается субширотное сжатие, а восточнее – уже субмеридиональное. Кроме того, на побережье для данного района исследования, по сейсмологическим данным, отмечается режим и субмеридионального растяжения. Этот характер смены поля напряжения присущ довольно ограниченной в масштабах острова площади, приблизительно 0.5° × 0.5°. Судя по геологическим и геофизическим признакам, в данном районе имеет место ярко выраженная аномалия поля напряжения. В геологическом отношении это, в частности, проявляется в резкой смене напластования от практически горизонтального до субвертикального (рис. 10). Такой резкий контраст можно наблюдать в масштабе нескольких сотен метров.

Наиболее интенсивная тектоническая активность Пограничного прогиба в условиях мощного сжатия проявлялась на границе мезозоя и кайнозоя [Зябрев, 2011]. Результатом этой активности было образование ракитинского тектоногенного комплекса ($mps\text{₽}_{1-2}r$) и мощных горизонтов олистостром в березовской свите (K_2br). Березовская свита объединяет мощную толщу терригенных образований (алевролитов и песчаников) с горизонтами олистостром, включающих линзы и блоки тектонизирован-

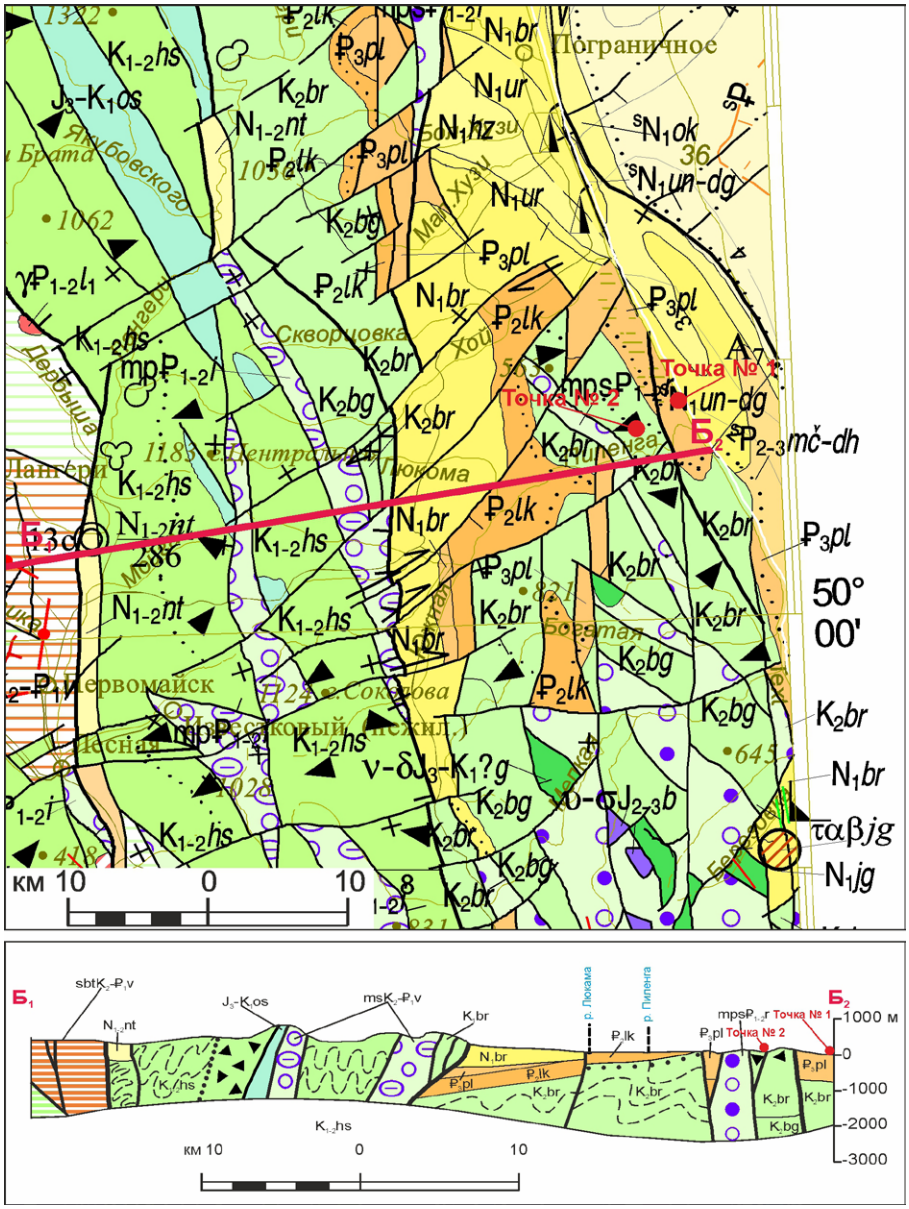


Рис. 9. Пограничный прогиб. Фрагмент Государственной геологической карты м-ба 1 : 1 000 000[2] и разрез по линии $Б_1$ – $Б_2$.
Figure 9. Pogranichniy depression. Fragment of the State geological map on a scale 1 : 1000 000[2] and the cross-section along the line $Б_1$ – $Б_2$.

[2] Государственная геологическая карта… [State geological map…]

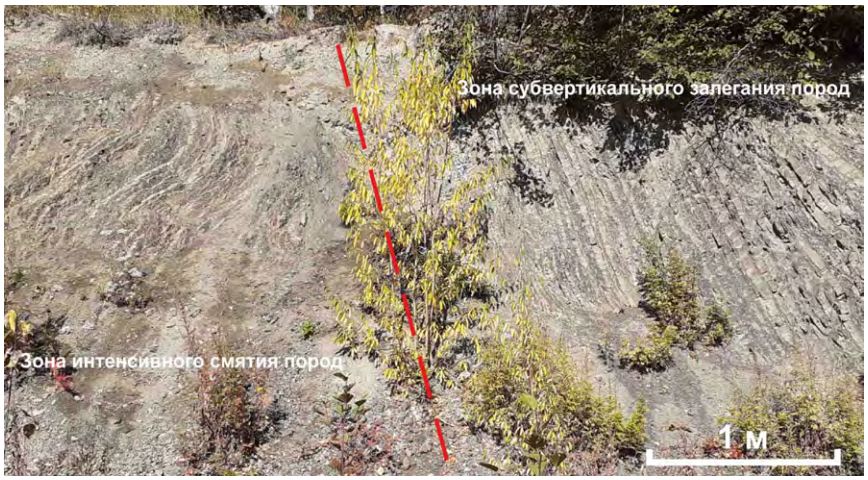


Рис. 10. Точка наблюдения 1. Пограничный прогиб, р. Пиленга, березовская свита (K_2br). Крутые падения пород, зона смятия, зона разлома. Красной линией здесь и на рис. 11 обозначены разрывные нарушения.

Figure 10. Observation point 1. Pogranichniy depression, Pilenga River, Berezovskaya formation (K_2br). High angle dip of strata, folding shear zone and fault zone. The red line indicates a fault core.

Рис. 11. Точка наблюдения 2. Пограничный прогиб, р. Пиленга, пиленгская свита. Пологое залегание пород. Плотность трещин выше в верхней, более кремнистой пачке.

Figure 11. Observation point 2. Pogranichniy depression, Pilenga River, Pilenga formation. Low angle dip of strata. The joints density is higher in the upper part with more siliceous bed.

ных вулканогенно-кремнистых и интрузивных пород. При общей выдержанности состава по латерали, набор слагающих олистострому олистолитов существенно варьирует. Зоны полимиктового меланжа ракитинского тектоногенного комплекса осложняют структурные планы позднемеловых и более ранних образований и запечатаны эоцен-олигоценовыми отложениями. На основании этого возраст тектоногенного комплекса условно принят позднепалеоценовым–раннеэоценовым. Структурный план комплекса характеризуется сложным чешуйчато-надвиговым типом дислокаций. Выполнен чешуйчато-листоватым терригенно-туфокремнистым материалом со слоями кремнистых катаклазитов, реже кремнистыми, амфиболовыми и серпентинитовыми сланцами, содержащими линзы и глыбы [Гальверсен и др., 2009].

Преобладание транстенсионного режима Пограничного прогиба начиная с эоцена подтверждается строением кайнозойского разреза в районе р. Хузи, где субвертикальное залегание пород пиленгской свиты сочетается с практически полным отсутствием мелких пликативных деформаций и трещиноватости. В северной части прогиба, в нижнем течении р. Керосинная, на протяжении 600 м в бортах и днище каньона отмечаются многочисленные дебитующие нефтепроявления, связанные с открытой трещиноватостью, которая, очевидно, свидетельствует о продолжающемся до настоящего времени режиме растяжения.

Некоторые блоки кайнозойского чехла (например, блок в районе р. Пиленга) практически не испытывали тектонического воздействия, о чем свидетельствуют пологие элементы залегания и незначительное количество трещин и зеркал скольжения. В этих условиях интенсивность трещиноватости зависит в первую очередь от литологии. Особенно наглядно такая зависимость наблюдается в верхней части пильской свиты, где чисто кремнистый разрез переходит в кремнисто-глинистый (рис. 11). В структуре замеров зеркал скольжений преобладают сбросовые, реже сдвиговые кинематические типы разрывов, что вполне соответствует результатам работ по региональной тектонике [Тютрин, Дуничев, 1985; Рождественский, 1975; Воейкова и др., 2007]. Резкая неоднородность поля напряжения, отраженная в характере элементов залеганий, структурных нарушений и парагенезов, указывает на необходимость дополнительного изучения данного района. Поэтому коллективом автором в 2021 г. запланирован большой объем полевых работ в районе Пограничного прогиба.

Заключение

Интенсивность трещиноватости кайнозойских отложений в районах исследования сильно зависит от литологии, расстояния точки относительно разлома и от оси пликативных структур. Направление трещин меняется в зависимости от положения относительно элементов локальных складок и от положения блока (при мелкоблочном строении). Для максимального учета геологической ситуации замеры трещиноватости проводились систематично, замерами были охвачены практически все стратиграфические подразделения и все литологические разности. В полевом журнале обязательно указывались: возраст, литология, расстояние до ближайших разломов, положение относительно элементов пликативных структур. Полученные результаты интерпретированы отдельно по разным элементам, там, где это возможно, элементы залегания приводились к общей нормали, а показатель плотности трещин использовался только с учетом литологии.

Полевые наблюдения показали, что зона интенсивных дислокаций имеет, как правило, крайне незначительную мощность – первые десятки метров.

Отмечена резкая неоднородность поля напряжения в районах Пограничного прогиба и п-ова Шмидта, отраженная в характере элементов залеганий, структурных нарушений и парагенезов. Данный факт указывает на необходимость дополнительного изучения районов исследования. В нижнем течении р. Керосинная были отмечены нефтепроявления, свидетельствующие о вероятном режиме растяжения.

На Сахалине находится несколько подобных районов, требующих детального изучения, где граничат различные по возрасту, генезису и строению структурно-тектонические элементы: Восточно-Сахалинские горы, Сусунайский хребет, Тонино-Анивский п-ов и п-ов Терпения. Особого внимания требуют также зоны региональных разломов (Хоккайдо-Сахалинский, Центрально-Сахалинский и т.д.).

Проведенные исследования показывают, что структурный анализ в районах с такой сложной и интенсивной историей тектонического развития, как активные окраины континентов, крайне необходим для получения качественной геологической информации. Такие данные весьма актуальны как для фундаментальных исследований по тектонофизике, так и в прикладных исследованиях с целью более детального изучения нетрадиционных типов коллекторов, в частности трещиноватых.

Список литературы

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

2. Гальверсен В.Г., Евсеев С.В., Коноваленко А.А., Хайбуллина Г.А. (сост.) **2016.** *Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Серия Сахалинская. Лист M-54-XVIII (Пограничное):* Объяснительная записка. Изд. 2-е. М.: Моск. фил. ФГБУ «ВСЕГЕИ», 187 с. Рек. к печати НРС Роснедра 01.12 2009.

3. *Геология СССР*. Т. 33. *Остров Сахалин. Геологическое описание* (ред. В.Н. Верещагин). **1970.** М.: Недра, 432 с.

4. Гладенков Ю.Б., Баженова О.К., Гречин В.И., Маргулис Л.С., Сальников Б.А. **2002.** *Кайнозой Сахалина и его нефтегазоносность*. М.: ГЕОС, 225 с.

5. Дымович В.А., Евсеев С.В., В.Ф. Евсеев и др. (сост.) **2016.** *Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Дальневосточная. Лист М-54 (Александровск-Сахалинский)*: Объяснительная записка. СПб: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ, 599 с. https://www.vsegei.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/Dalnevostochnaya/m-54.php

6. Жиров Д.В. **2019.** Информативность трещиноватости для прикладных аспектов геологии и горного дела: геометрия и строение трещин. В кн.: *Российская тектонофизика. К 100-летнему юбилею Михаила Владимировича Гзовского: сборник статей* (отв. ред. чл.-корр. РАН Ю.А. Морозов). Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 294–328.

7. Зябрев С.В. **2011.** Стратиграфия и структура центральной части Восточно-Сахалинской аккреционной призмы (Восток России). *Тихоокеанская геология*, 30(4): 49–73.

8. Каменев П.А., Дегтярев В.А., Костров Ю.В., Маринин А.В., Бондарь И.В., Гордеев Н.А., Халиулин Р.Р., Хмарин Э.К., Левин А.В. **2021.** Изучение трещинных коллекторов северного Сахалина в рамках комплексной экспедиции 2020 г. *Вестник ДВО РАН*, 2: 114–122.

9. Кирмасов А.Б. **2011.** *Основы структурного анализа*. М.: Научный мир, 368 с.

10. Кожурин А.И., Лободенко И.Ю., Стром А.Л. **2009.** Следы сильных землетрясений на полуострове Шмидта – северной части острова Сахалин в голоценовое время. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, 4: 23–29.

11. Коноваленко А.А, Васюк И.Б., Костров Ю.В. и др. **2009.** *Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Сахалинская. Лист N-54-XXIV – Восточный*: Объяснительная записка. СПб., 91 с.

12. Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. **2014.** *Современные исследования очагов землетрясений о. Сахалин и механизмов их возникновения.* Владивосток: Дальнаука, 252 с.

13. Опарин В.Н., Востриков В.И., Усольцева О.М., Цой П.А., Семенов В.Н. **2015**. Комплексное исследование особенностей проявления физических полей под влиянием флюидоразрыва. Лабораторный эксперимент. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2(3): 173–178.

14. Расцветаев Л.М. **1987.** Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений. *В кн.: Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов*. М.: ГИН АН СССР, 173–235.

15. Ребецкий Ю.Л. **2007**. *Тектонические напряжения и прочность природных массивов*. М.: Академкнига, 406 с.

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

17. Рождественский В.С. **1975.** Сдвиги Северо-Восточного Сахалина. *Геотектоника*, 2: 85–97.

18. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. **2017.** Неотектоника и тектонические напряжения о. Сахалин. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(1): 181–202. https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237

19. Тютрин И.И., Дуничев В.М. **1985.** *Тектоника и нефтегазоносность северо-западной части Тихоокеанского пояса*. М.: Недра, 174 с.

20. Харахинов В.В. **2010.** *Нефтегазовая геология Сахалинского региона*. М.: Научный мир, 276 с.

21. *Экосистемы кайнозоя Охотоморского региона. Опорный разрез палеогена и неогена Северного Сахалина (п-ов Шмидта): стратиграфия, палеогеография и геологические события* (отв. ред. Ю.Б. Гладенков). **1999.** М.: ГЕОС, 132 с.

22. Llanos E.M., Jeffrey R.G., Hillis R., Zhang Xi. **2017.** Hydraulic fracture propagation through an orthogonal discontinuity: A laboratory, analytical and numerical study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50: 2101–2118. doi:10.1007/s00603-017-1213-3

23. Gale J.F., Laubach S.E., Olson J.E., Eichhubl P., Fall A. **2014.** Natural fractures in shale: A review and new observations. *AAPG (Am. Assoc. Pet. Geol.) Bull.*, 98(11): 2165–2216. https://doi.org/10.1306/08121413151

24. Wang H.Yi. **2019.** Hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs: Complex fracture or fracture networks. *J. of Natural Gas Science and Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102911

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

26. Polets A.Yu. **2019.** The stress state of the Sakhalin Island and adjacent territories. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324, 012010. https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012010

References

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

2. Gal'versen V.G., Evseev S.V., Konovalenko A.A., Khaybullina G.A. (comp.) **2016.** [*State geological map of Russian Federation on a scale of 1:200 000. Sakhalin series. Sheet M-54-XVIII (Pogranichnoe)*]: [Explanatory note. Second edition]. Moscow: Moskovskiy filial FGBU «VSEGEI», 187 p. [Recommend for print by Rosnedra Scientific editorial board, December 1, 2009]. (In Russ.).

3. *Geology of USSR*. Vol. 33. *Sakhalin Island*. *Geological description* (ed. V.N. Vereshchagin). **1970.** Moscow: Nedra, 432 p.

4. Gladenkov Yu.B., Bazhenova O.K., Grechin V.I., Margulis L.S., Sal'nikov B.A. **2002.** [*The Cenozoic of Sakhalin and its petroleum potential*]. Moscow: GEOS, 225 p. (In Russ.).

5. Dymovich V.A., Evseev S.V., Evseev V.F. et al. (comp.) **2016.** [*State geological map of Russian Federation on a scale of 1:1 000 000. State geological map of Russian Federation on a scale of 1:1 000 000. Third generation. Far East series. Sheet M-54 (Aleksandrovsk-Sakhalinskiy)*]: [Explanatory note]. Saint Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 599 p. (In Russ.).
https://www.vsegei.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/Dalnevostochnaya/m-54.php

6. Zhirov D.V. **2019.** [Information capacity of jointing for applied aspects of geology and mining industry: geometry and structure of cracks]. In: Yu.A. Morozov (ed.) [*Russian tectonophysics. For the centenary of Mikhail V. Gzovskii*]: [collection of articles]. Apatity: FITs KNTs RAN, 294–328. (In Russ.).

7. Zyabrev S.V. **2011.** Stratigraphy and structure of the central East Sakhalin accretionary wedge (Eastern Russia). *Russian J. of Pacific Geology*, 5(4): 313–335.

8. Kamenev P.A., Degtyarev V.A., Kostrov Yu.V., Marinin A.V., Bondar' I.V., Gordeev N.A., Khaliulin R.R., Khmarin E.K., Levin A.V. **2021.** Study of fractured reservoirs in Northern Sakhalin as part of a comprehensive expedition in 2020. *Vestnik DVO RAN*, 2: 114–122. (In Russ.). doi:10.37102/0869-7698_2021_216_02_12

9. Kirmasov A.B. **2011.** [*Fundamentals of structural analysis*]. Moscow: Nauchnyy mir, 368 p.

10. Kozhurin A.I., Lobodenko I.Yu., Strom A.L. **2009.** [Evidence of strong earthquakes on the Schmidt Peninsula – northern part of Sakhalin Island in the Holocene]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy* [*Geology, geophysics and development of oil and gas fields*], 4: 23–29. (In Russ.).

11. Konovalenko A.A., Vasyuk I.B., Kostrov Yu.V. et al. **2009.** [*State geological map of Russian Federation on a scale of 1:200 000. Sakhalin series. Sheet N-54-XXIV (Vostochnyy)*]: [Explanatory note]. Saint Petersburg, 91 p. (In Russ.).

12. Konovalov A.V., Nagornykh T.V., Safonov D.A. **2014.** *Sovremennye issledovaniya ochagov zemletryaseniy o. Sakhalin i mekhanizmov ikh vozniknoveniya* [*Modern studies of earthquake sources mechanisms of Sakhalin Island*]. Vladivostok: Dal'nauka, 252 p. (In Russ.).

13. Oparin V.N., Vostrikov V.I., Usol'tseva O.M., Tsoy P.A., Semenov V.N. **2015.** [Integrated analysis of characteristics of physical fields under effect of fluid fracturing. Laboratory experiment]. *Interekspo Geo-Sibir'*, 2(3): 173–178. (In Russ.).

14. Rastsvetaev L.M. **1987.** [Paragenetic method of structural analysis of disjunctive tectonic faults]. In: *Problemy strukturnoy geologii i fiziki tektonicheskikh protsessov* [*Problems of structural geology and physics of tectonic processes*]. Moscow: GIN AN SSSR, 173–235. (In Russ.).

15. Rebetskiy Yu.L. **2007.** *Tektonicheskie napryazheniya i prochnost' prirodnykh massivov* [*Tectonic stresses and strength of natural massifs*]. Moscow: Akademkniga, 406 p. (In Russ.).

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

17. Rozhdestvenskiy V.S. **1975.** [Strike-slip faults in Northeastern Sakhalin]. *Geotektonika* [*Geotectonics*], 2: 85–97. (In Russ.).

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

19. Tyutrin I.I., Dunichev V.M. **1985.** *Tektonika i neftegazonosnost' severo-zapadnoy chasti Tikhookeanskogo poyasa* [*Tectonics and petroleum potential of the northwestern part of the Pacific belt*]. Moscow: Nedra, 174 p. (In Russ.).

20. Kharakhinov V.V. **2010.** [*Petroleum geology of the Sakhalin region*]. Moscow: Nauchnyy mir, 276 p. (In Russ.).

21. *Ekosistemy kaynozoya Okhotomorskogo regiona. Opornyy razrez paleogena i neogena Severnogo Sakhalina (p-ov Shmidta): stratigrafiya, paleogeografiya i geologicheskie sobytiya* [*Cenozoic ecosystems of the Sea of Okhotsk region. The Paleogene and Neogene reference section of North Sakhalin (the Schmidt Peninsula): stratigraphy, paleogeography, and geological events*] (Ed. Yu.B. Gladenkov). **1999.** Moscow: GEOS, 132 p. (In Russ.).

22. Llanos E.M., Jeffrey R.G., Hillis R., Zhang Xi. **2017.** Hydraulic fracture propagation through an orthogonal discontinuity: A laboratory, analytical and numerical study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50: 2101–2118. doi:10.1007/s00603-017-1213-3

23. Gale J.F., Laubach S.E., Olson J.E., Eichhubl P., Fall A. **2014.** Natural fractures in shale: A review and new observations. *AAPG (Am. Assoc. Pet. Geol.) Bull*., 98(11): 2165–2216. https://doi.org/10.1306/08121413151

24. Wang H.Yi. **2019.** Hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs: Complex fracture or fracture networks. *J. of Natural Gas Science and Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102911

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

26. Polets A.Yu. **2019.** The stress state of the Sakhalin Island and adjacent territories. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324, 012010. https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012010

Об авторах

КОСТРОВ Юрий Викторович, главный специалист отдела подготовки объектов геологоразведочных работ, ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», Южно-Сахалинск, yvkostrov@snipi.rosneft.ru

ДЕГТЯРЕВ Владислав Анатольевич (ORCID 0000-0001-8922-3654), аспирант, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, ведущий специалист отдела подготовки объектов геологоразведочных работ ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», Южно-Сахалинск, degtyarevvladislav96@yandex.ru

МАРИНИН Антон Витальевич (ORCID 0000-0002-1099-6492), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта, Москва, marinin@yandex.ru

ХМАРИН Эдуард Константинович, начальник управления геологоразведочных работ ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», Южно-Сахалинск, ekkhmarin@snipi.rosneft.ru

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

About Authors

KOSTROV Yuri V., Head Specialist of the Department for the preparation of the geological prospects, LLC RN-SakhalinNIPImorneft, Yuzhno-Sakhalinsk, yvkostrov@snipi.rosneft.ru

DEGTYAREV Vladislav A. (ORCID 0000-0001-8922-3654), Postgraduate, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Leading Specialist of the Department for the preparation of the geological prospects, LLC RN-SakhalinNIPImorneft, Yuzhno-Sakhalinsk, degtyarevvladislav96@yandex.ru

MARININ Anton V. (ORCID 0000-0002-1099-6492), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, marinin@yandex.ru

KHMARIN Eduard K., Head of geological exploration department, LLC RN-SakhalinNIPImorneft, Yuzhno-Sakhalinsk, ekkhmarin@snipi.rosneft.ru

KAMENEV Pavel A. (ORCID 0000-0002-9934-5855), Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher of CCU, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, p.kamenev@imgg.ru

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

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

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 551.21

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.167-171

Активизация вулкана Пик Сарычева в 2020–2021 гг. (о. Матуа, Центральные Курильские острова)

© 2021 *А. В. Дегтерев*, М. В. Чибисова*

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
**E-mail: d_a88@mail.ru*

Резюме. В настоящей публикации, основывающейся на данных дистанционного зондирования, рассмотрены особенности эффузивного извержения вулкана Пик Сарычева (о. Матуа, Центральные Курильские острова), происходившего с декабря 2020 по февраль 2021 г. На основе анализа спутниковых данных Sentinel установлено, что с декабря 2020 г. кратер вулкана Пик Сарычева начал заполняться лавой. По состоянию на 18 января 2021 он был полностью заполнен, после чего через расщелину в северо-северо-западной части началось излияние лавы. Лавовый поток (длиной 2 км, шириной 80–90 м) спустился по дну барранкоса, рассекающего северо-западный склон вулканического конуса. Излияние лавы завершилось к 7 февраля 2021 г. Эффузивное извержение вулкана Пик Сарычева в 2020–2021 гг. является нетипичным для современного этапа эруптивной истории, характеризующегося извержениями преимущественно эксплозивного и эксплозивно-эффузивного типа.

Ключевые слова: Курильские острова, Пик Сарычева, вулкан, лавовый поток, извержение, спутниковые снимки, данные дистанционного зондирования

Activation of the Sarychev Peak volcano in 2020–2021 (Matua Isl., the Central Kuril Islands)

Artem V. Degterev, Marina V. Chibisova*

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
**E-mail: d_a88@mail.ru*

Abstract. This publication, based on remote sensing data, examines the features of the effusive eruption of the Sarychev Peak volcano (Matua Isl., the Central Kuril Islands), which took place from December 2020 till February 2021. On the basis of the analysis of the Sentinel satellite data, it was established that starting from December 2020, the crater of the Sarychev Peak volcano began to fill with lava. As of January 18, 2021, it was completely filled, then lava outpouring through a fissure in the north-northwest part began. A lava flow (length 2 km, width 80–90 m) descended along the bottom of the valley, which cuts the northwestern slope of the volcanic cone. The outpouring of lava was completed by February 7, 2021. The effusive eruption of the Sarychev Peak volcano in 2020–2021 is atypical for the modern stage of eruptive history, characterized mainly by explosive and explosive-effusive type of eruptions.

Keywords: The Kuril Islands, the Sarychev Peak volcano, volcano, lava flow, eruption, satellite images, remote sensing data

Для цитирования: Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Активизация вулкана Пик Сарычева в 2020–2021 гг. (о. Матуа, Центральные Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 2, с. 167–171. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.167-171

***For citation*:** Degterev A.V., Chibisova M.V. Activation of Sarychev Peak Volcano in 2020–2021 (Matua Isl., the Central Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 167–171. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.167-171

Благодарности и финансирование
Работа выполнена в соответствии с планом НИР лаборатории вулканологии и вулканоопасности

Acknowledgements and Funding
The work was carried out in accordance with the SIW research plan of the Laboratory of volcanology

ИМГиГ ДВО РАН «Вулканизм Сахалина и Курильских островов: мониторинг, хронология активности, вещественный состав продуктов, гидротермальные системы» (регистр. номер НИОКР ГР 121030100168-3; дата регистрации в ФГАНУ «Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти» 24.02.2021; рук. работы А.В. Рыбин). Финансовая поддержка гранта Президента Российской Федерации «Современные газогеохимические особенности газогидротермальных систем, грязевых вулканов, термальных и минеральных источников острова Сахалин, их связь с сейсмичностью и формированием газоопасных зон заселенных территорий», 2021–2022 гг. (рук. Н.С. Сырбу, ТОИ ДВО РАН).

and volcanic hazard IMGG FEB RAS "Volcanism of Sakhalin and the Kuril Islands: monitoring, chronology of activity, material composition of products, hydrothermal systems" (Registration number SIOKR 121030100168-3. Registration date in FGANU "The Center for Information Technologies and Systems of Executive Authorities" 02.24.2021. Head of the work – A.V. Rybin). Financial support of the grant of the President of the Russian Federation "Modern gas-geochemical features of gas-hydrothermal systems, mud volcanoes, thermal and mineral springs of Sakhalin Island, their relationship with seismicity and the formation of gas hazardous zones of populated areas", 2021–2022 (headed by N.S. Syrbu, POI FEB RAS).

Введение

Вулкан Пик Сарычева, расположенный на о. Матуа (Центральные Курильские острова), является одним из самых активных вулканов Сахалинской области. Последнее извержение вулкана, происходившее в 2017–2018 гг., носило эксплозивный характер – произошла серия пепло-газовых выбросов слабой и умеренной силы (максимальная высота выбросов составляла 4.5 км, а протяженность пеплового шлейфа – 255 км). В 2020–2021 гг. отмечена очередная активизация вулкана, детали которой рассмотрены в настоящей публикации. Ее основу составляют данные дистанционного зондирования (Sentinel-1 (SAR), Sentinel-2 (SWIR) и Sentinel-5P (TROPOMI)), полученные из информационных систем MOUNTS (http://www.mounts-project.com/home; [Valade et al., 2019]) и MIROVA (http://www.mirovaweb.it/), а также ресурса EO Browser Sentinel Hub (https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/). Кроме того, в работе использовались результаты полевых наблюдений, проводившихся нами на острове Матуа в 2008–2010, 2017 гг.

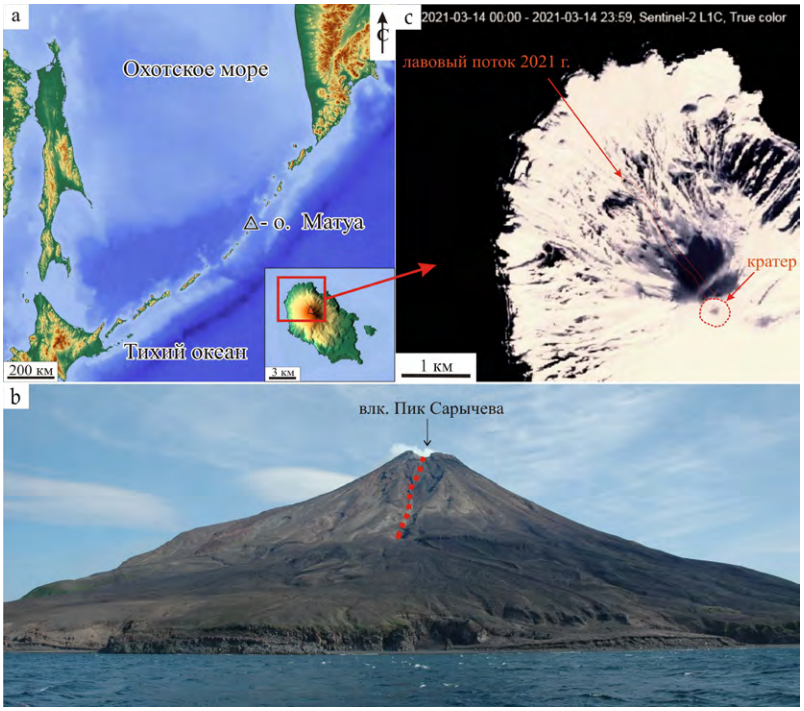


Рис. 1. Географическое положение о. Матуа с вулканом Пик Сарычева: (a) обзорная карта; (b) общий вид влк. Пик Сарычева (северо-западный сектор), отмечен барранкос, по которому спустился лавовый поток 2021 г. *Фото А.В. Рыбина*; (c) фрагмент спутникового снимка Sentinel-2 (истинный цвет) за 14.03.2021, отмечен лавовый поток, излившийся в 2021 г.

Figure 1. Geographical location of Matua Isl. with the Sarychev Peak volcano: (a) an overview map, (b) general view of the Sarychev Peak volcano (north-western sector), the valley, along which the 2021 lava flow descended, is marked. *Photo by A.V. Rybin*; (c) Sentinel-2 satellite image (true color) for 03.14.2021, an erupted in 2021 lava flow was noted.

Действующий вулкан Пик Сарычева (абс. выс. 1446 м) формирует северо-западную часть о. Матуа, расположенного в центральной части Курильской островной дуги (рис. 1). Вулканическая постройка представляет собой посткальдерный стратовулкан с вершинным кратером, являющийся центром его современных извержений (1765 ± 5, 1878–1879, 1923, 1928, 1930, 1946, 1954, 1960, 1976, 2009, 2017–2018, 2020–2021 гг. [Андреев и др., 1978; Горшков, 1948, 1954, 1967;

Дегтерев, 2011; Мархинин, 1964; Шилов, 1962; Rybin et al., 2011; Чибисова, Дегтерев, 2019]. Его диаметр ~ 375 м, а глубина изменяется от извержения к извержению в довольно широких пределах: по состоянию на 1946 г. (до извержения) глубина кратера составляла ~100–150 м [Горшков, 1948], после извержения 1946 г., по измерениям, проведенным в 1954 и 1960 гг. [Горшков, 1954, 1967; Мархинин, 1964], она увеличилась до 200 м.

После извержения 1976 г. глубина кратера [Андреев и др., 1978] составляла 50–70 м (при этом усадка лавы продолжалась). В 2007 г. лавовая пробка находилась примерно на одном уровне с наиболее низкой северо-западной кромкой кратера [Дегтерев, 2011] (рис. 2 a). После мощного эксплозивно-эффузивного извержения 2009 г. его глубина вновь увеличилась: по спутниковым изображениям Aster Terra, непосредственно после извержения кратер имел глубину не менее 150 м. В июне 2017 г. глубина кратера, по нашим визуальным оценкам, составляла ~100 м [Рыбин и др., 2017] (рис. 2 b).

Рис. 2. Кратер вулкана Пик Сарычева в 2007 г. (a, *фото А.К. Клитина*) и в 2017 г. (b, *фото А.В. Дегтерева*). Стрелкой отмечена расщелина, через которую произошло излияние лавового потока.

Figure 2. Crater of the Sarychev Peak volcano in 2007 (a, *photo by A.K. Klitin*) and in 2017 (b, *photo by A.V. Degterev*). The arrow marks the fissure, through which the outpouring of the lava flow took place.

Извержение 2020–2021 гг.

По данным информационных систем MOUNTS (http://www.mounts-project.com/home; [Valade et al., 2019]) и MIROVA (http://www.mirovaweb.it/), начиная с октября 2020 г. на влк. Пик Сарычева начали отмечаться термальные аномалии (следует отметить, что термальные аномалии фиксировались и в летние месяцы, наиболее интенсивные – в период с июля по сентябрь, однако мы допускаем, что они могли быть ложными и возникать из-за разогрева шлаковых полей: ежегодно подобные аномалии регистрируются нами на вулканах Тятя и Кудрявый, особенно часто это наблюдается в весеннее и летнее время года). На спутниковых снимках Sentinel, сделанных осенью 2020 г. (30.09; 12.10; 20.10; 11.11), вулкан характеризуется проявлением типичной для его кратера интенсивной парогазовой активности.

Примерно с 01.12.2020 г., по данным SAR-снимков Sentinel-1 (рис. 3), в кратер влк. Пик Сарычева начала поступать лава. К середине декабря она сформировала купол, расположенный несколько эксцентрично к северу от его центра (рис. 3). По состоянию на 06.01.2021 г. кратер был заполнен примерно наполовину, при этом материал продолжал поступать. К 18 января 2021 г. кратер оказался полностью заполнен лавой (рис. 3), после чего, через расщелину в северо-северо-западной части кромки (рис. 2 b), началось ее излияние по внешнему склону вулканической постройки (рис. 4). 27.01.2021 г. протяженность лавового потока составляла 1.51 км, его продвижение контролировалось рельефом – лава распространялась по дну глубокого барранкоса, рассекающего северо-западный склон вулкана (рис. 1). К 30.01.2021 г. лавовый поток имел длину 1.76 км и ширину 80–90 м (до 200 м в верхней части – у его истока) (рис. 4). По спутниковым данным на 07.02.2021 г., длина лавового потока достигала 2 км (в предыдущие дни вулкан был закрыт облачностью, не позволяющей установить точную дату окончания излияния лавового потока, это произошло приблизительно между 31 января и 2 февраля).

В последующие дни, в феврале и марте, на вулкане периодически отмечались слабые термальные аномалии. На снимках Sentinel (14, 16, 19, 21 марта, 3 апреля 2021 г.) центральная часть кратера практически свободна от снега, наблюдается заметное парение. Извержение завершилось в конце февраля 2021 г.

Эффузивное извержение влк. Пик Сарычева в 2020–2021 гг. нетипично для современного этапа активности рассматриваемой вулкано-магматической системы: за весь период активизации вулкана в 2020–2021 гг. не было зафиксировано никаких проявлений эксплозивного характера. Между тем в историческое время (~250 лет для Курильских островов) на вулкане преобладали извержения эксплозивного и эксплозивно-эффузивного типа: от относительно слабых эксплозий до мощных пароксизмов плинианского типа: 1765 ± 5 (эксплозивное, эксплозивно-эффузивное?), 1878–1879 (эффузивное, эффузивно-эксплозивное?), 1923 (эксплозивное), 1928 (эксплозивное), 1930 (эксплозивное), 1946 (эксплозивно-эффузивное), 1954 (эксплозивное), 1960 (эксплозивное), 1976 (эксплозивно-эффузивное), 2009 (эксплозивно-эффузивное), 2017–2018 гг. (эксплозивное). Все они были терминальными и, как правило, непродолжительными (часы, дни). При этом поставляется главным образом обломочный вулканический материал – тефра и пирокластические потоки. Пик Сарычева – единственный вулкан Курильской дуги, при исторических извержениях которого сектор пеплопада выходил далеко за пределы островной гряды, выпадая на Камчатке и на территории Хабаровского края и Сахалина [Рыбин и др., 2010]. Типичный пример – сильное эксплозивно-эффузивное извержение в июне 2009 г. В этой связи необходимы специальные вулканологические работы, направленные на комплексное изучение особенностей этого неординарного события.

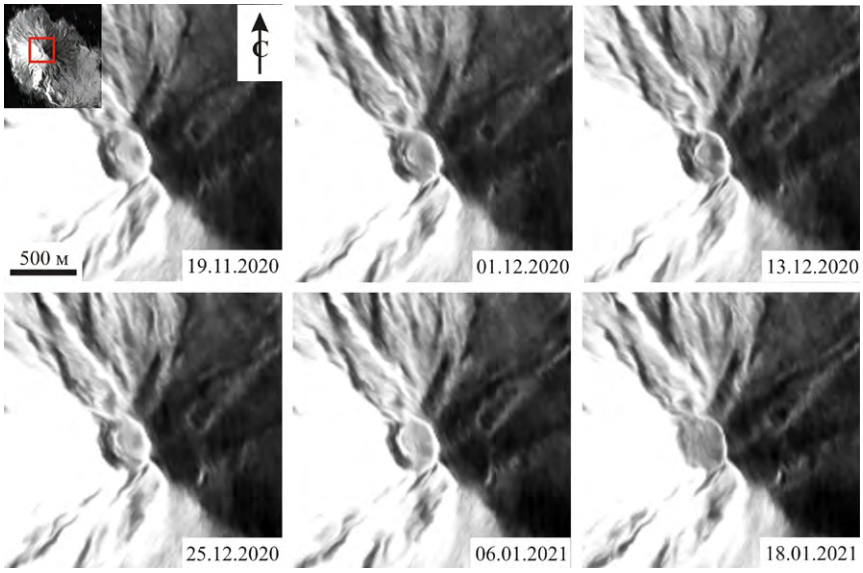


Рис. 3. Процесс заполнения кратера вулкана Пик Сарычева лавой в период с 19.11.2020 по 18.01.2021 на снимках Sentinel-1 SAR.

Figure 3. Filling process of the crater of the Sarychev Peak volcano with lava in the period from 19.11.2020 till 18.01.2021 on the Sentinel-1 SAR images.

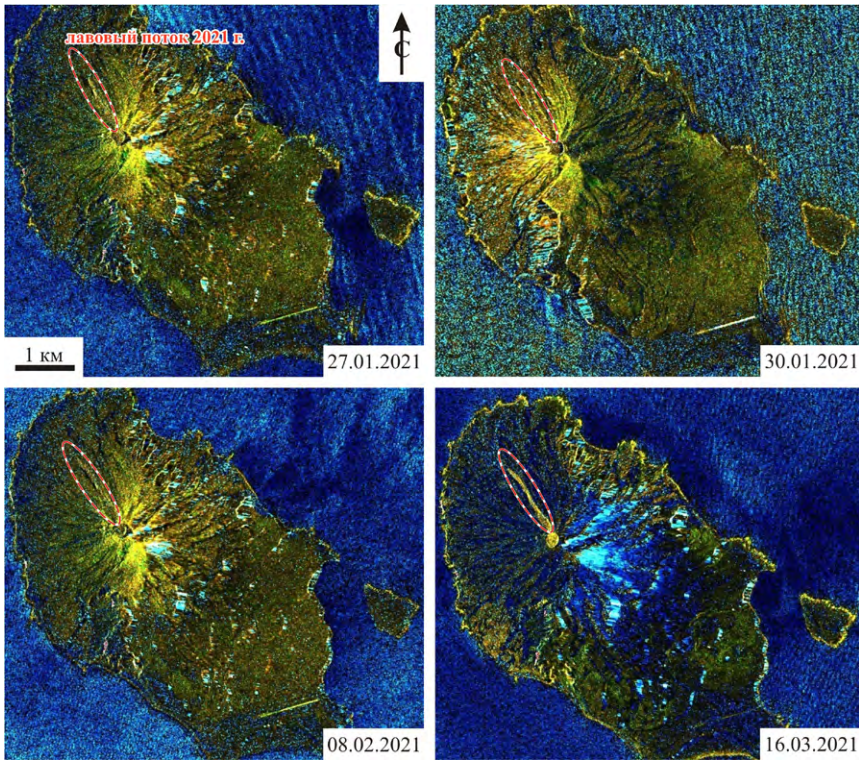


Рис. 4. Динамика излияния лавового потока вулкана Пик Сарычева на спутниковых снимках Sentinel-1 SAR (radiometric terrain corrected).

Figure 4. Dynamics of the outpouring of the lava flow of the Sarychev Peak volcano on the Sentinel-1 SAR satellite images (radiometric terrain corrected).

Список литературы

1. Андреев В.Н., Шанцер А.Е., Хренов А.П. и др. **1978.** Извержение вулкана Пик Сарычева в 1976 г. *Бюллетень вулканологических станций*, 55: 35–40.

2. Горшков Г.С. **1948.** Вулкан Пик Сарычева. *Бюллетень вулканологических станций*, 15: 3–7.

3. Горшков Г.С. **1954.** Хронология извержений вулканов Курильской гряды. *Труды Лаборатории вулканологии*, 106(8): 58–99.

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

5. Дегтерев А.В. **2011.** Пирокластические отложения извержения вулкана Пик Сарычева (о. Матуа) в июне 2009 г. *Вулканология и сейсмология*, 4: 60–68. https://doi.org/10.1134/S0742046311040026

6. Мархинин Е.К. **1964.** Вулкан Сарычева. *Бюллетень вулканологических станций*, 35: 44−58.

7. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Коротеев И.Г. **2010.** Проблемы мониторинга вулканической активности на Курильских островах. *Вестник ДВО РАН*, 3: 64–72.

8. Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Дудченко И.П. и др. **2017.** Комплексные исследования на острове Матуа в 2017 году. *Геосистемы переходных зон*, (4): 21–29. doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.4.021-029

9. Чибисова М.В., Дегтерев А.В. **2019.** Активность вулкана Пик Сарычева (о. Матуа, Средние Курилы) в 2017–2018 гг.: по спутниковым и визуальным данным. *Геосистемы переходных зон*, 3(1): 144–148. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.144-148

10. Шилов В.Н. **1962.** Извержение вулкана Пик Сарычева в 1960 году. *Труды СахКНИИ*, 12: 143−149.

11. Rybin A., Chibisova M., Webley P. et al. **2011.** Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak volcano, Matua Island, Central Kuriles. *Bull. of Volcanology*, 73(4): 40–56. https://doi.org/10.1007/s00445-011-0481-0

References

1. Andreev V.N., Shantser A.E., Khrenov A.P. et al. **1978.** [The Sarychev Peak volcano eruption in 1976]. *Byulleten' vulkanologicheskikh stantsiy* [*Bull. of volcanological stations*], 55: 35–40. (In Russ.).

2. Gorshkov G.S. **1948.** [Sarychev Peak volcano]. *Byulleten' vulkanologicheskikh stantsiy* [*Bull. of volcanological stations*], 15: 3–7. (In Russ.).

3. Gorshkov G.S. **1954.** [Chronology of Kuril ridge volcanoes eruption]. *Trudy Laboratorii vulkanologii* [*Transactions of the Laboratory of volcanology*], 106(8): 58–99. (In Russ.).

4. Gorshkov G.S. **1967.** [*Volcanism of the Kuril island arc*]. Moscow: Nauka, 287 p. (In Russ.).
URL: http://repo.kscnet.ru/156/1/Gorshkov_1967.pdf (accessed 04.04.2021).

5. Degterev A.V. **2011.** Pyroclastic deposits from Sarychev Peak, Matua Island discharged in June 2009. *J. of Volcanology and Seismology*, 5(4): 278–285.https://doi.org/10.1134/s0742046311040026

6. Markhinin E.K. **1964.** [Sarychev Peak volcano]. *Byulleten' vulkanologicheskikh stantsiy* [*Bull. of volcanological stations*], 35: 44−58. (In Russ.).

7. Rybin A.V., Chibisova M.V., Koroteev I.G. **2010.** The problems of volcanic activity monitoring on the Kurile Islands. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 3: 64–72. (In Russ.).

8. Rybin A.V., Degterev A.V., Dudchenko I.P., Guryanov V.B., Romanyuk F.A., Klimantsov I.M. **2017.** Comprehensive research on Matua Island in 2017. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, (4): 21–29. (In Russ., abstr. in Engl.). doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.4.021-029

9. Chibisova M.V., Degterev A.V. **2019.** The activity of Sarychev Peak volcano (Matua Island, Middle Kuriles) in 2017–2018: on the basis satellite and visual data. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(1): 144–148. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.144-148

10. Shilov V.N. **1962.** [The Sarychev Peak volcano eruption in 1960]. *Trudy SakhKNII SO AN SSSR* [*Transactions of the Sakhalin Complex Scientific Research Institute SB AS of USSR*], 12: 143−149. (In Russ.).

11. Rybin A., Chibisova M., Webley P. et al. **2011.** Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak volcano, Matua Island, Central Kuriles. *Bull. of Volcanology*, 73(4): 40–56. https://doi.org/10.1007/s00445-011-0481-0

Сведения об авторах

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

ЧИБИСОВА Марина Владимировна (ORCID 0000-0003-0677-6945), старший научный сотрудник, лаборатория вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, m.chibisova@imgg.ru

About Authors

DEGTEREV Artem V. (ORCID 0000-0001-8291-2289), Cand. of Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, d_a88@mail.ru

CHIBISOVA Marina V. Chibisova (ORCID 0000-0003-0677-6945), Senior Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, m.chibisova@imgg.ru

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

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

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 551.465

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.172-178

О необычном характере распространения модифицированной амурской воды в заливе Анива (Сахалин) в ноябре 2001 г.

© 2021 *Г. В. Шевченко*[1,2], *В. Н. Частиков*[1]

[1]*Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск, Россия*
[2]*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия*
**E-mail: shevchenko_zhora@mail.ru*

Резюме. В дополнение к результатам исследования распространения модифицированной воды стока реки Амур в удаленном от его устья заливе Анива по данным 2012–2013 гг. (Шевченко Г.В., Частиков В.Н. Распространение вод Амура в восточной части залива Анива поздней осенью. *Метеорология и гидрология*, 2021, № 1) рассмотрены материалы океанологической съемки, выполненной в этом бассейне в середине ноября 2001 г. Показано, что распресненная вода заходила в залив необычно широким потоком в верхнем 30-метровом слое и занимала обширную область, почти до середины залива. При этом различия в показателях солености с местными водами были меньше, чем обычно. Наиболее вероятной причиной таких специфических особенностей океанологических условий в 2001 г. было усиление (примерно на 30 % по сравнению с обычными значениями) ветра западно-северо-западного румба отжимного характера. Полученные результаты показывают, что влияние этой воды может проявляться не только вблизи восточного берега залива, как было продемонстрировано в указанной статье, но и на удалении от него более 30 км. Соответственно, резкие понижения солености могут воздействовать на морскую биоту не только прибрежного комплекса, но и обитающую в центральной части залива.

Ключевые слова: температура, соленость, сток, Амур, модифицированная вода, залив Анива

On the unusual distribution of modified Amur River water in the Aniva Bay (Sakhalin) in November 2001

Georgy V. Shevchenko[1,2], *Valery N. Chastikov*[1]

[1]*Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*
[2]*Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*
**E-mail: shevchenko_zhora@mail.ru*

Abstract. In addition to the distribution of modified water of the Amur River runoff in the Aniva Bay, remote from its mouth, according to the data from 2012–2013 (Shevchenko G.V., Chastikov V.N. Distribution of the Amur waters in the eastern part of the Aniva Bay in late autumn. *Meteorology and Hydrology*, 2021, no. 1), the materials of the oceanological survey carried out in this basin in mid-November 2001 are presented. It is shown that desalinated water entered the bay in an unusually wide stream in the upper 30-meter layer and occupied a vast area, almost to the middle of the bay. At the same time, the differences in salinity with local waters were less than usual. The most probable reason for such specific features of oceanological conditions in 2001 was an increase (by about 30% in comparison with the usual values) of the wind of west-northwest rhumb of an offshore character. The obtained results show that the influence of this water can manifest itself not only near the eastern coast of the bay, as was demonstrated in the mentioned article, but also at a distance of more than 30 km from it. Accordingly, abrupt decreases in salinity can affect the marine biota not only of the coastal complex, but also inhabiting the central part of the bay.

Keywords: temperature, salinity, runoff, Amur, modified water, Aniva Bay

Для цитирования: Шевченко Г.В., Частиков В.Н. О необычном характере распространения модифицированной амурской воды в заливе Анива (Сахалин) в ноябре 2001 г. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 2, с. 172–178.
https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.172-178

For citation: Shevchenko G.V., Chastikov V.N. On the unusual distribution of modified Amur River water in the Aniva Bay (Sakhalin) in November 2001. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 172–178. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.172-178

Введение

Изучение влияния стока р. Амур на акватории, прилегающей к южным и юго-восточным берегам о. Сахалин, представляет значительный интерес, так как с ним связаны резкие, на 2–3 е.п.с., понижения солености морской воды на шельфе, наблюдающиеся обычно поздней осенью (ноябрь–декабрь). Ситуация, когда речная вода, смешиваясь с морскими водами и образуя модифицированную воду пониженной солености, достигает областей, находящихся на удалении около 1000 км, является весьма необычной, и подобные вариации солености редки в областях, удаленных от устьев крупных рек. Этому вопросу, в частности влиянию модифицированной воды на гидрологические условия в восточной части зал. Анива, посвящено не так много работ. Так, при исследовании гидрологии залива [Пищальник, Архипкин, 2000, 2003] это явление не рассматривалось, а в [Шевченко, Частиков, 2004; Будаева и др., 2005] обсуждалось лишь фрагментарно. Детально оно рассмотрено только в недавней публикации авторов [Шевченко, Частиков, 2021]. На основе материалов двух океанологических съемок, выполненных 29–31 октября и 29 ноября – 4 декабря 2013 г., а также инструментальных измерений океанологических параметров в 2012 г. были выявлены резкие понижения солености (до 27.5 е.п.с. в декабре 2012 г.) вдоль восточного берега зал. Анива, обусловленные затоком модифицированной воды стока р. Амур.

В данной работе в краткой форме представлены некоторые дополнительные сведения о весьма необычном характере распространения распресненной воды в изучаемом бассейне на основе океанологической съемки в ноябре 2001 г.

Результаты океанологической съемки 15–17 ноября 2001 г.

Как правило, модифицированная вода стока р. Амур распространяется вдоль восточного берега зал. Анива сравнительно узкой полосой. Об этом свидетельствуют средние многолетние распределения солености морской воды на поверхности моря в ноябре и декабре (рис. 1), построенные на основе базы данных «Атлас» [Пищальник, Бобков, 2000]. В этой базе содержатся значения температуры и солености на станциях стандартных разрезов (показаны точками на рисунках), полученные в результате обобщения довольно многочисленных экспедиционных исследований, регулярно выполнявшихся Сахалинским управлением Росгидромета в 1950–1980-е годы. Осреднение результатов океанологических зондирований позволяет выделить типовые, повторяющиеся из года в год особенности распределения океанологических параметров (редкие ситуации при данной операции нивелируются), поэтому формирование узкого прибрежного потока распресненной воды является типичной картиной. Это и физически объяснимо, так как градиент плотности между менее плотной модифицированной водой и более солеными местными водами залива способствует именно вдольбереговому ее затоку.

В последние годы океанологические съемки в данном бассейне проводит Сахалинский филиал ВНИРО (СахНИРО), поздней осенью (ноябрь–декабрь) они были выполнены в 1993, 2001, 2002, 2008, 2009, 2013 и 2015 гг. В одной из них (экспедиция на НИС «Дмитрий Песков» проходила 15–17 ноября 2001 г.) наблюдалось существенное отклонение от типичной картины вдольберегового распространения воды, и оно заслуживает специального рассмотрения.

Пространственное распределение солености в зал. Анива на горизонте на поверхности моря представлено на рис. 2. Область с наиболее низкими значениями солености (менее 31.1 е.п.с.) вытянута широкой полосой на значительном (15–20 км) удалении от берега. Влияние модифицированной воды распространялось до лагуны Буссе на север и практически до середины залива на запад, что является исключительной ситуацией – при других съемках подобная картина не наблюдалась. Если бы такое распределение было выявлено только

на поверхности моря, то можно было бы думать, что распресненная вода распространилась по поверхности тонким слоем, как это бывает при ветрах северо-восточного и восточного румбов. Это и было обнаружено при съемке 29 ноября – 4 декабря 2013 г. [Шевченко, Частиков, 2021]. Но в ноябре 2001 г. она наблюдалась в верхнем слое толщиной 10–12 м (пространственное распределение солености на горизонте 10 м идентично имевшему место на поверхности), т.е. в восточную часть залива попал значительный объем воды низкой солености. Отметим также пятно распресненной воды вблизи западного берега залива, в районе Хвостово, которое проявляется и на среднем многолетнем распределении в ноябре. Вероятно, оно сформировалось в результате осеннего паводка на реках южной части Сахалина (Лютога, Сусуя, Таранай, Урюм), впадающих в северо-западную часть изучаемого бассейна, и сместилось в южном направлении под действием геострофической силы и ветра. Отметим также сравнительно высокие значения солености в северо-западной части залива, куда впадают указанные реки и где обычно находится распресненная вода. Вероятной причиной наблюдаемой картины может быть апвеллинг, формирующийся в этом районе под действием типичных для осени ветров северо-западного румба.

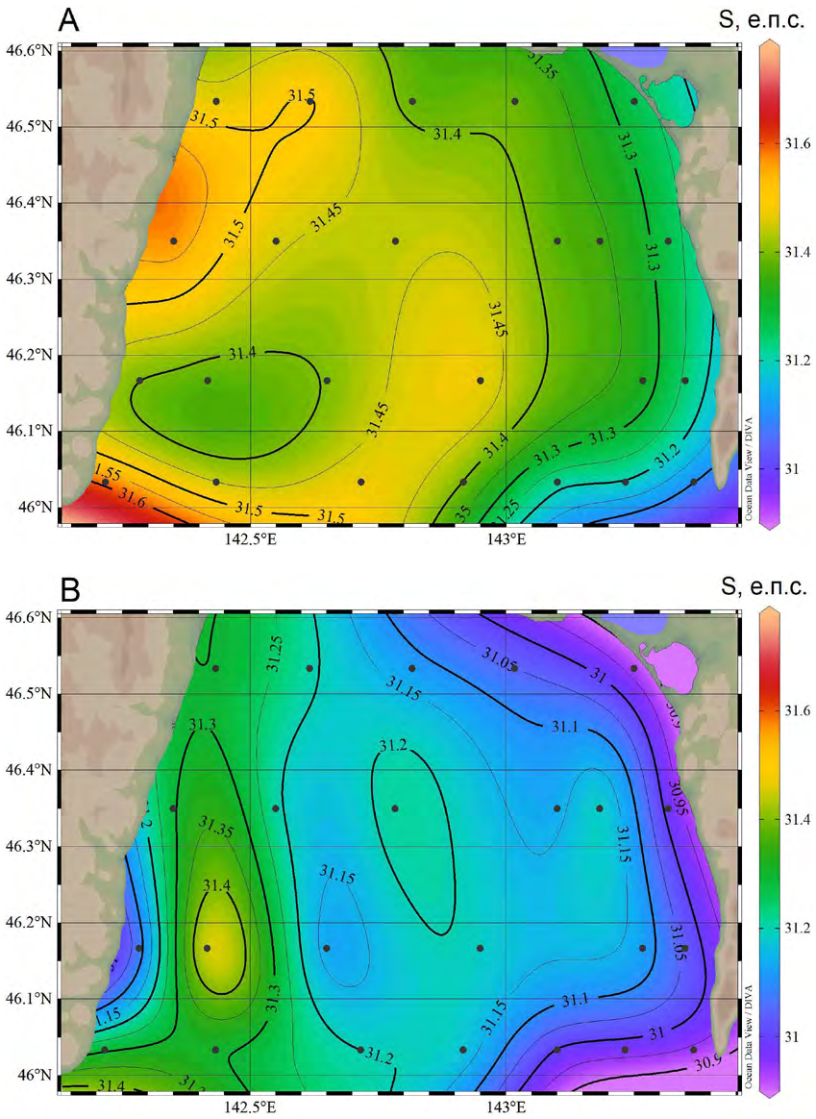


Рис. 1. Средние многолетние распределения солености (е.п.с.) морской воды в поверхностном слое зал. Анива в ноябре (A) и декабре (B). Черными точками показано положение четырех стандартных разрезов (нумерация с севера на юг).

Figure 1. Long-term annual average salinity distributions (psu) in the surface layer of the Aniva Bay in November (A) and December (B). The black dots show the position four standard sections (numbered from north to south).

На рис. 3 приведены вертикальные распределения солености на разрезе III по результатам океанологических съемок в ноябре 2001 и конце октября 2013 г. Этот разрез (второй снизу на рис. 1) расположен недалеко от открытой границы зал. Анива, он является ключевым для понимания характера затока модифицированной воды амурского стока в этот бассейн. Обращает внимание, что в условиях экстремального стока р. Амур модифицированная вода (соленость менее 31 е.п.с., минимальные значения менее 30 е.п.с.) занимала узкую прибрежную полосу у восточного берега залива, в глубину до 30 м, в то время как в 2001 г. эта вода (соленость около 31.1 е.п.с.) заходила в залив широким потоком (более 30 км), развитым в глубину до 30 м, а вблизи берега – до 40 м, что подтверждает высказанное выше мнение о значительном объеме поступившей в залив модифицированной воды. Правда, соленость ее была несколько выше типичных значений. Однородный характер солености в восточной части разреза может быть обусловлен интенсивным ветро-волновым перемешиванием. Различие по показателям солености с заполняющими залив местными

водами было сравнительно невелико, в то время как в 2013 г. оно было существенным. Соответственно, градиент в поле плотности в первом случае был относительно невелик, и скорости потока, формирующегося в соответствии с геострофическим балансом, изменялись в пределах от нескольких см/с в центральной части залива до 15 см/с вблизи берега.

На вертикальном распределении солености в обоих случаях выделяется также пятно распресненнной воды в западной части разреза, которое отмечалось выше. В 2013 г. соленость в нем была существенно, примерно на 1 е.п.с., ниже, чем в 2001 г. Соответственно и скорость его движения на юг была в несколько раз выше, чем в 2001 г.

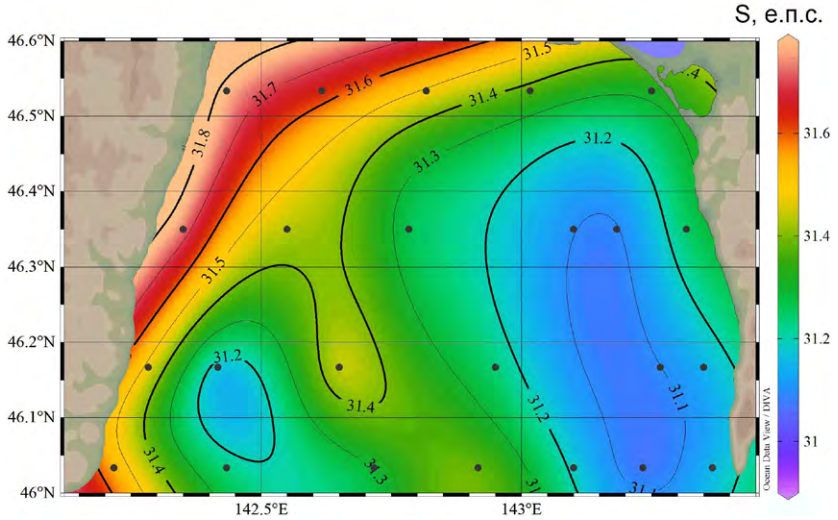


Рис. 2. Распределение солености (е.п.с.) морской воды в зал. Анива на поверхности моря по результатам океанологической съемки 15–17.11.2001 г.

Figure 2. Salinity distribution (psu) in the Aniva Bay on the sea surface according to the results of an oceanographic survey on November 15–17, 2001.

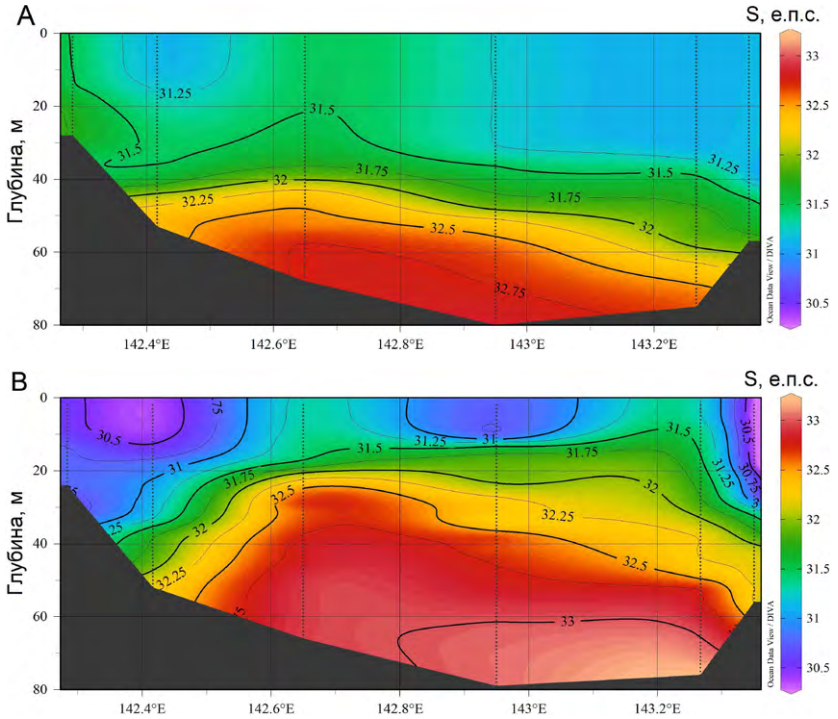


Рис. 3. Вертикальные распределения солености (е.п.с.) на разрезе III по измерениям в ноябре 2001 (А) и октябре 2013 г. (В).

Figure 3. Vertical salinity distributions (psu) in the section III according to measurements in November 2001 (A) and October 2013 (B).

Таким образом, специфической особенностью океанологических условий в зал. Анива в ноябре 2001 г. были большая ширина потока и, соответственно, существенно превышающий типичные значения объем модифицированной воды, поступившей в залив (при значениях солености выше типичных), а также необычный характер ее пространственного распределения. Подобной картины не наблюдалось при других съемках, выполненных СахНИРО в последние десятилетия (средние многолетние распределения солености в ноябре и декабре свидетельствуют о распространении распресненной воды в узкой полосе вдоль берега). Оба эти факта указывают на уникальность рассмотренной выше гидрологической ситуации.

Чтобы выяснить физические причины, обусловившие столь необычный характер распространения модифицированной воды стока р. Амур в зал. Анива в ноябре 2001 г., дополнительно проанализировали доступную гидрометеорологическую информацию, в результате чего выявили ряд особенностей, присущих рассматриваемому сезону.

Во-первых, в 2001 г. по наблюдениям на створе в г. Хабаровск объем стока р. Амур был на сравнительно низком уровне – около 70 % от среднего многолетнего значения, рассчитанного за период с 1936 по 2006 г. Таким образом, объем модифицированной воды материкового стока у восточного побережья о. Сахалин

мог быть меньше обычного, однако к зал. Анива это утверждение явно не относится.

В работе [Власова и др., 2008] по результатам океанологической съемки, выполненной сотрудниками СахНИРО на НИС «Павел Гордиенко» на северо-восточном шельфе о. Сахалин в первой половине сентября 2001 г., отмечено, что перестройка поля ветра к осеннему муссону произошла раньше обычного и на северном участке района исследований уже наблюдалось начало движения распресненной воды в южном направлении.

Более важными с точки зрения рассматриваемого явления были результаты океанологической съемки НИС «Профессор Хромов» в середине октября 2001 г. на нескольких стандартных разрезах у восточного побережья о. Сахалин и в зал. Анива. На рис. 4 приведены вертикальные распределения солености на разрезах мыс Терпения – море (зондирования осуществлялись 13 октября) и мыс Анива – мыс Докучаева (15 октября, рассматривались станции северо-западной части разреза).

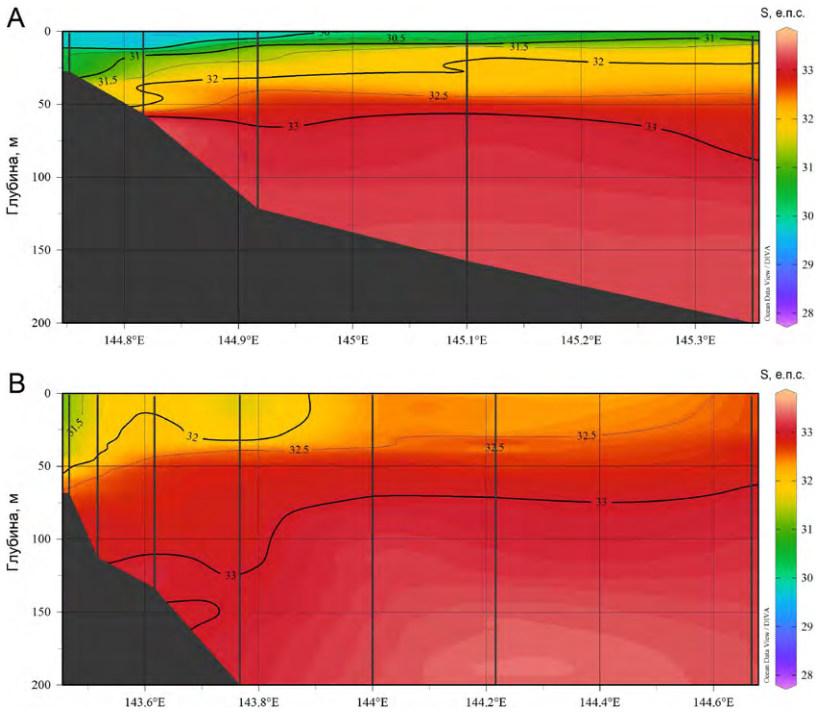


Рис. 4. Вертикальные распределения солености (е.п.с.) на стандартных разрезах мыс Терпения – море (A) и мыс Анива – мыс Докучаева, прилегающая к Сахалину часть разреза (B) по измерениям в октябре 2001 г.

Figure 4. Vertical salinity distributions (psu) on the standard sections of Cape Terpeniya - sea (A) and Cape Aniva – Cape Dokuchaev, part of the section adjacent to Sakhalin (B) according to measurements in October 2001.

На первом из них соленость была существенно, почти на 1 е.п.с., ниже нормы и модифицированная вода стока р. Амур в поверхностном слое простиралась достаточно далеко на восток, до 145 меридиана, что также отличается от средних многолетних значений [Шевченко, Частиков, 2019]. Первое обстоятельство в условиях относительно низкого объема речного стока может быть объяснено как более ранним началом движения распресненной воды в южном направлении, так и тем фактом, что на северо-восточный шельф Сахалина поступил все-таки достаточно большой ее объем, вероятно, за счет менее значимых потерь по трассе распространения. Второе отчасти может быть результатом выявленного по данным реанализа ветрового потока (подробнее обсуждается ниже): в октябре 2001 г. наблюдалось отклонение его направления, по сравнению с обычным, на восток.

На разрезе мыс Анива – мыс Докучаева характер пространственного распределения солености был более близок к обычному, хотя значения в верхнем 10-метровом слое в прибрежной его части были примерно на 0.25 е.п.с. ниже средних многолетних значений [Шевченко, Частиков, 2007], что также может быть связано с более ранней осенней интенсификацией Восточно-Сахалинского течения и значительным объемом модифицированной воды, достигшей юго-восточной оконечности острова. Распространение модифицированной воды в восточном направлении дальше обычного также идентифицируется в данном районе, что можно проследить по положению изогалины 32 е.п.с. В данном районе распресненная вода материкового происхождения явно отличается от окружающих более соленых охотоморских вод, за границу раздела можно принять изогалину 31.5 е.п.с. В зал. Анива, где соленость местных вод ниже, такой границей, как следует из рис. 1, в ноябре является изогалина 31.3 е.п.с. (в 2001 г. – 31.2 е.п.с), а в декабре, в период максимального влияния модифицированной воды, она снижается до 31.1 е.п.с.

Выполненные 16–17 октября 2001 г. НИС «Профессор Хромов» океанологические исследования в зал. Анива выявили лишь начальные признаки влияния воды материкового происхождения в юго-восточной части IV разреза, ее проникновение в изучаемый бассейн только начиналось.

Поскольку характер вертикального распределения солености с охотоморской стороны мыса Анива не отличался принципиально от среднего многолетнего, то необычный характер распространения модифицированной воды материкового происхождения в зал. Анива мог быть связан только с местными условиями, среди которых наиболее вероятным представляется воздействие ветра. Анализ данных реанализа в точке на акватории изучаемого бассейна (http://www.esrl.noaa.gov/ (дата обращения: 21.12.2015), координаты 46.6°с.ш., 142.5°в.д.) за 1997–2011 гг. показал, что действительно характер воздушных потоков осенью 2001 г. существенно отличался от типичных для этого периода года. Так, средний вектор скорости ветра за первую половину ноября (этот период в наибольшей степени определял характер распределения вод в поверхностном слое в период океанологической съемки) составлял 6.4 м/с для зональной (направление на восток) и 1.8 м/с для меридиональной (на юг) при средних многолетних значениях 4.8 и 2.0 м/с соответственно. Следует учесть, что, несмотря на усиление над открытым морем зональной составляющей, у берега гористого Тонино-Анивского полуострова под влиянием орографии формируется, скорее всего, вдольбереговой воздушный поток, оставляющий берег слева. Это создает сгонный эффект и способствует оттеснению модифицированной воды от берега. Преобладание ветров северо-западного румба типично для осени (зимний муссон), но при обычных условиях сила ветра, вероятно, недостаточна для преодоления геострофического баланса, стремящегося сохранить эту воду в прибрежной зоне. Однако в ноябре 2001 г. усиление ветра привело к оттеснению распресненной воды материкового происхождения к центру залива, а также, вероятно, к более интенсивному вертикальному перемешиванию, что выразилось в характере вертикального распределения солености. Сильные ветра западно-северо-западного румба были также вероятной причиной апвеллинга в северо-западной части зал. Анива, обусловившего необычно высокие значения солености в поверхностном слое.

Заключение

В дополнение к результатам исследования распространения модифицированной воды стока р. Амур в восточной части зал. Анива, приведенным в работе [Шевченко, Частиков, 2021], рассмотрены материалы океанологической съемки, выполненной в середине ноября 2001 г., когда данный процесс существенно отличался по своему характеру от обычного. Это проявлялось в значительном объеме поступившей в данный бассейн распресненной воды (при сравнительно небольших различиях в солености с местными водами), а также в более широкой, почти до середины залива, зоне ее влияния. Наиболее вероятной причиной таких необычных особенностей изучаемого явления было существенное (примерно на 30 %) усиление ветра западно-северо-западного румба по сравнению со средними многолетними значениями. Этот ветер имел отжимной характер у восточного берега залива и способствовал оттеснению распресненной воды от берега, а также он мог быть причиной интенсивного вертикального перемешивания на данном участке изучаемого бассейна.

Хотя подобные события, скорее всего, случаются достаточно редко, их вероятность необходимо учитывать при изучении экосистемы зал. Анива и оценках возможных воздействий резких вариаций солености морской воды на морскую биоту, и не только ее прибрежного комплекса в восточной части бассейна, но и обитающую в его центральной части.

Список литературы

1. Будаева В.Д., Макаров В.Г., Частиков В.Н. **2005.** Результаты гидрологических исследований залива Анива в 2001–2003 гг. (структура и циркуляция вод). *Труды СахНИРО*, Южно-Сахалинск, 7: 83–110.

2. Власова Г.А., Васильев А.С., Шевченко Г.В. **2008.** *Пространственно-временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря*. М.: Наука, 356 с.

3. Пищальник В.М., Архипкин В.С. **2000**. Сезонная изменчивость термохалинной структуры вод пролива Лаперуза. *Вестн. МГУ, Сер. 5, География*, 5: 43–47.

4. Пищальник В.М., Бобков А.О. **2000.** *Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин.* Ч. 2. Южно-Сахалинск: СахГУ, 108 с.

5. Пищальник В.М., Архипкин В.С., Юрасов Г.И., Ермоленко С.С. **2003.** Сезонные вариации циркуляции вод в прибрежных районах о. Сахалин. *Метеорология и гидрология*, 5: 87–95.

6. Шевченко Г.В., Частиков В.Н. **2004.** Динамические процессы в заливе Анива (о. Сахалин) по результатам инструментальных измерений осенью 2000 г. *Метеорология и гидрология*, 5: 63–75.

7. Шевченко Г.В., Частиков В.Н. **2007.** Сезонные и межгодовые вариации океанологических условий в юго-западной части Охотского моря. *Метеорология и гидрология*, 3: 69–85.

8. Шевченко Г.В., Частиков В.Н. **2019.** Сезонная изменчивость гидрологических характеристик на северо-восточном шельфе о. Сахалин. *Океанологические исследования*, 47(3): 246–263.

9. Шевченко Г.В., Частиков В.Н. **2021.** Распространение вод Амура в восточной части залива Анива поздней осенью. *Метеорология и гидрология*, 1: 111–116.

References

1. Budaeva V.D., Makarov V.G., Chastikov V.N. **2005.** Results of hydrological studies of Aniva bay in 2001–2003 (waters structure and circulation). *Transactions of the SakhNIRO*, Yuzhno-Sakhalinsk, 7: 83–110. (In Russ.).

2. Vlasova G.A., Vasil'ev A.S., Shevchenko G.V. **2008.** *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' struktury i dinamiki vod Okhotskogo morya* [*Spatio-temporal variability of the structure and dynamics in the Sea of Okhotsk waters*]. Moscow: Nauka, 356 p. (In Russ.).

3. Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S. **2000.** [Seasonal variability of the thermohaline structure of the waters in the La Perouse Strait]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta = Moscow University Vestnik, Series 5, Geography*, 5: 43–47. (In Russ.).

4. Pishchal'nik V.M., Bobkov A.O. **2000.** [*Oceanographic atlas of the shelf zone of Sakhalin Island*]. Pt 2. Yuzhno-Sakhalinsk: SakhGU, 108 p. (In Russ.).

5. Pishchalnik V.M., Arkhipkin V.S., Yurasov G.I., Ermolenko S.S. **2003.** Seasonal variations of water circulations in the coastal regions of Sakhalin. *Russian Meteorology and Hydrology*, 5: 66–72.

6. Shevchenko G.V., Chastikov V.N. **2004.** Dynamic processes in Aniva bay (Sakhalin) from results of instrumental measurements in the fall of 2000. *Russian Meteorology and Hydrology*, 5: 39–48.

7. Shevchenko G.V., Chastikov V.N. **2007.** Seasonal and interannual variability of oceanographic conditions in the southwestern part of the Sea of Okhotsk. *Russian Meteorology and Hydrology*, 32(3): 194–205. https://doi.org/10.3103/s1068373907030077

8. Shevchenko G.V., Chastikov V.N. **2019.** Seasonal variability of oceanological conditions on the northeastern Sakhalin shelf based on the surveys on standard sections. *J. of Oceanological Research*, 47(3): 246–263. (In Russ.). https://doi.org/10.29006/1564-2291.jor-2019.47(3).19

9. Shevchenko G.V., Chastikov V.N. **2021.** Spreading of the Amur river water in the eastern Aniva bay in late autumn. *Meteorologiya i Gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 1: 111–116. (In Russ.). https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-1-111-116

Об авторах

ШЕВЧЕНКО Георгий Владимирович (ORCID 0000-0003-0785-4618), доктор физико-математических наук, зав. лабораторией океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО), ведущий научный сотрудник лаборатории цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, shevchenko_zhora@mail.ru

ЧАСТИКОВ Валерий Николаевич, научный сотрудник лаборатории океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск, v.chastikov@sakhniro.ru

About the Authors

SHEVCHENKO Georgy V. (ORCID 0000-0003-0785-4618), Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory of the oceanography, Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, Leading Researcher of the Tsunami laboratory, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, shevchenko_zhora@mail.ru

CHASTIKOV Valery N., Researcher of the Laboratory of the oceanography, Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk, v.chastikov@sakhniro.ru

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

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

УДК 551.4.042

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.179-188

Оценка эластичности стока рек восточной части бассейна Амура

© 2021 *С. Ю. Лупаков*

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия
**E-mail: rbir@mail.ru*

Резюме. Учитывая неустойчивый режим увлажнения и многообразие ландшафтов в пределах бассейна р. Амур, проблема оценки влияния климатических изменений на процессы приземного влагооборота в регионе становится многоаспектной, связанной с решением частных задач. В работе на основе коэффициента эластичности исследовалась реакция речного стока на изменения количества атмосферных осадков. Объектом настоящего исследования являются малые и средние речные бассейны (всего 52), относящиеся к системе Среднего и Нижнего Амура. Использовались данные стандартных наблюдений на гидрологических постах и метеорологических пунктах за летне-осенний паводкоопасный период (июнь–сентябрь). Ряды данных отбирались таким образом, чтобы они включали различные условия увлажнения. Выяснено, что при увеличении количества осадков на 1 % сток рек в паводкоопасный сезон в 48 случаях увеличивался на 1.02–3.86 %, в 4 случаях уменьшался. Результаты работы принципиально близки к региональным оценкам в бассейне р. Амур на основе анализа фактического материала (в том числе в ближайшем зарубежье) и результатам моделирования, а также к значениям коэффициента эластичности стока, полученным в различных географических зонах и приведенным в профильной литературе. Исследована связь значений коэффициента эластичности стока с различными бассейновыми показателями. Для рек, расположенных в Приморском крае (водосбор р. Уссури), выявлена связь значений коэффициента эластичности с сезонными суммами слоев стока и осадков, коэффициентом стока, средней высотой, уклонами водосборов и средними уклонами речной сети. Обсуждается влияние локальных условий формирования стока на отклик речных бассейнов при изменении количества атмосферных осадков.

Ключевые слова: коэффициент эластичности, осадки, сток, изменения климата, река Амур

Estimation of the runoff elasticity of the rivers in the eastern part of the Amur River basin

Sergey Yu. Lupakov

Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
**E-mail: rbir@mail.ru*

Abstract. Taking into account the unstable moisture regime and the diversity of landscapes within the Amur River basin, the problem of assessing the impact of climatic changes on the processes of surface water cycle in the region becomes multifaceted, associated with the solution of particular problems. This work studied the reaction of a river runoff to changes in the amount of atmospheric precipitation on the basis of the elasticity coefficient. Small and medium-sized river basins (52 in total) belonging to the system of the Middle and Lower Amur are the objects of this study. The data of standard observations at hydrological posts and meteorological points for the summer-autumn flood hazard period (June-September) were used. The data series were selected to include different moisture conditions. It was found that with an increase in precipitation by 1 %, the river runoff in the flood hazard season has increased by 1.02–3.86 % in 48 cases, and decreased in 4 cases. The results of the work are fundamentally close to the regional estimates within the basin of the Amur River on the base of the analysis of factual material (including the near abroad) and simulation results, as well as to the values of the runoff elasticity coefficient obtained in different geographic zones and given in the specialized literature. The relationship between the elasticity

coefficient values of runoff with various basin indicators has been studied. For the rivers in the Primorsky Kray (catchment area of the Ussuri River), the relationship between the elasticity coefficient values and the seasonal runoff and precipitation, the runoff coefficient, average height, catchments slopes and average river network slopes has been revealed. The influence of local conditions of runoff formation on the river basins response to changes in the amount of atmospheric precipitation is discussed.

Keywords: elasticity coefficient, precipitation, streamflow, climate changes, Amur river

Для цитирования: Лупаков С.Ю. Оценка эластичности стока рек восточной части бассейна Амура. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 2, с. 179–188. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.179-188

For citation: Lupakov S.Yu. Estimation of the runoff elasticity of the rivers in the eastern part of the Amur River basin. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 179–188. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.179-188

Введение

Изучение влияния долгосрочных изменений климата на речной сток является одной из актуальных задач современных наук о Земле [IPCC, 2013]. Это связано с возрастающей потребностью в водных ресурсах для нужд экономики и коммунального снабжения, а также с необходимостью обеспечения безопасности населения и объектов техносферы, находящихся в непосредственной близости к водным объектам и в частности рекам.

Наиболее обсуждаемым проявлением климатических изменений является повышение приземных температур [IPCC, 2013]. Известно, что темпы потепления на северо-востоке Азии превышают общемировые. По некоторым оценкам [Новороцкий, 2007; Мещенина и др., 2007], в бассейне р. Амур за прошедшее столетие температура воздуха увеличилась на 1.3 °C. Средняя скорость потепления оценена на уровне 0.25 °C/10 лет [Новороцкий, 2011], в отдельных частях бассейна достигает 0.37 °C/10 лет [Новороцкий, 2013]. Совместно с температурным режимом претерпевают изменения и процессы приземного влагооборота, с чем, например, связывают последовательность гидрологических событий редкой повторяемости в бассейне р. Амур за последние 20–30 лет [Гарцман, Лупаков, 2017].

Река Амур является одной из крупнейших в Азии с площадью водосбора около 2 млн км^2 [Гарцман, Галанин, 2011]. Бассейн Амура находится на границе системы «суша–океан», в пределах четырех государств – России, КНР, Монголии и КНДР. Орография региона достаточно сложная, что связано с разнообразием и разновозрастностью геологических структур. Рельеф стокоформирующих областей бассейна в целом горный. Климат территории можно рассматривать как континентальный с муссонными проявлениями. Большую часть питания реки бассейна Амура получают от летне-осенних дождей. Весеннее половодье обычно слабо выражено и растянуто во времени. Основная фаза гидрологического режима – летние паводки.

Оценка изменений водного режима под влиянием климатических изменений зачастую выполняется с помощью применения гидрологических моделей, на вход которых подаются последовательности метеорологических характеристик, трансформированные относительно исторических значений в соответствии с определенным сценарием изменения климата [Krysanova, Hattermann, 2017]. Для бассейна р. Амур известно относительно немного работ подобной тематики [Хон, Мохов, 2012; Гельфан и др., 2018], в которых результаты получены для замыкающих створов крупных рек. В контексте обсуждаемого вопроса малые речные водосборы в бассейне р. Амур также недостаточно исследованы. Другой подход заключается в анализе данных исторических наблюдений на основе так называемого коэффициента эластичности [Sankarasubramanian et al., 2001; Chiew, 2006]. Этот метод довольно широко распространен благодаря достаточности небольшого количества входной информации, обычно массово доступной (ряды данных по речному стоку, атмосферным осадкам, температуре воздуха). В применении к бассейну Амура описываемый подход был реализован для небольшого количества объектов в Приморском крае [Гарцман, Лупаков, 2019].

Важным выводом, полученным в работах с применением коэффициента эластичности, является непропорциональный отклик речного стока на изменение количества осадков. Например, увеличение осадков на 1 % вызывает увеличения стока в среднем на 2–3 % в Австралии [Chiew, 2006], до 2.5 % в разных регионах США [Sankarasubramanian et al., 2001], до 3 %

в целом по всему миру [Chiew et al., 2006]. Следовательно, при увеличении количества осадков на 10–20 % в рамках климатических изменений можно ожидать роста характеристик стока на 20–60 % и более, что представляет значимую величину, особенно в условиях экстремальных дождевых паводков.

Настоящую работу можно рассматривать как попытку расширения географии речных бассейнов, в которых проведена оценка влияния изменения количества осадков на речной сток на основе непараметрического коэффициента эластичности. Акцент сделан на относительно небольших и средних по площади водосборах в бассейне р. Амур: с его российской стороны проанализировано 52 объекта.

Основной задачей являлось подтвердить факты непропорционального отклика речного стока на изменение количества атмосферных осадков, полученные ранее, в том числе с использованием гидрологических моделей и данных глобальных климатических моделей. Альтернативный подход в целом подтвердил полученные выводы: в подавляющем большинстве проанализированных объектов увеличение осадков летне-осеннего сезона на 1 % привело к росту суммарного слоя стока за тот же период на 1.02–3.86 %. Дополнительно была проведена корреляция значений коэффициента эластичности с некоторыми бассейновыми характеристиками. Связи были найдены только для замыкающего створа у пос. Кировский на р. Уссури, и только для бассейновых характеристик стока, средних высот, а также средних уклонов водосборов и речной сети.

Материалы и методы

В пределах бассейна Амура были выбраны водосборы (см. таблицу в конце статьи), для которых имелись данные стандартных гидрометеорологических наблюдений за стоком длительностью минимум 30 лет за период с июня по сентябрь. Также ключевое условие к рядам расходов было наличие 2013 года, как отражающего экстремальные условия стокоформирования практически на всех исследуемых объектах. К рядам атмосферных осадков предъявлялись те же требования, что и к гидрологической информации. Каждому водосбору соответствовал один или несколько метеопунктов, расположенных в его пределах или непосредственной близости. Сезонной суммой осадков на каждый год для отдельного водосбора считалось среднее арифметическое из данных метеопунктов, приуроченных к каждому водосбору.

Учитывая наличие данных, сложности с их репрезентативным пространственным осреднением, а также невысокую плотность наблюдательной сети, было решено ограничиться площадью водосборов 30 000 км^2. Суммарно в работе использованы данные с 52 гидрологических постов и 86 метеопунктов (см. таблицу в конце статьи). Наибольшее количество исследуемых объектов находится в Приморском крае, около двух десятков – в Хабаровском крае, Амурской области и Еврейской автономной области в сумме. Водосборы Забайкалья и с китайской стороны Амура не рассматривались.

Длительность рядов данных заметно варьирует. В среднем, по стоку начало данных приходится на 1940–1960-е годы, конец – на 2018 г. Длина ряда осадков, как правило, несколько больше.

Для оценки влияния изменений стока при соответствующем изменении осадков применялся непараметрический критерий [Sankarasubramanian et al., 2001] в виде

$$e = median\left(\frac{Q_i - \overline{Q}}{P_i - \overline{P}} \times \frac{\overline{P}}{\overline{Q}}\right), \qquad (1)$$

где $\overline{Q}$ и $\overline{P}$ – среднемноголетний слой стока и осадков соответственно за июнь–сентябрь, Q_i и P_i – слой стока и осадков за i-й сезон. Для исследуемых объектов $\overline{Q}$ составляет от 60 до 340 мм, $\overline{P}$ от 330 до 780 мм (см. таблицу), коэффициент стока варьирует от 0.15 до 0.70.

В целом, уравнение (1) отражает чувствительность гидрологических систем к долгосрочным колебаниям климата. В данном случае оно показывает, насколько в процентах изменится сезонный сток при увеличении количества осадков на 1 %.

К преимуществам методики стоит отнести достаточность относительно небольшого набора данных; отсутствие необходимости применять гидрологические модели для оценки возможных изменений стока; устойчивость результатов для объектов по всему миру [Sankarasubramanian, Vogel, 2003; Chiew, 2006]; отражение интегрального поведения основных элементов водного баланса. К недостаткам относится невысокое временное разрешение, обычное для оценок на основе измеренных данных (среднегодовых или,

как в настоящей работе, среднесезонных); учет только наблюденных ситуаций, что ограничивает выполнимость экстраполяции результата расчетов; невозможность рассмотрения изменения частоты и распределения атмосферных осадков; отсутствие учета трансформации подстилающей поверхности водосборов и других влияющих на сток характеристик, например температуры воздуха и связанного с ним испарения. Последним можно пренебречь, поскольку во время паводков роль испарения заметно снижается [Гарцман, 2008], а также по причине общей обратной связи между количеством осадков и температурой [Chiew et al., 2013], из чего следует, что в регионах с достаточным увлажнением прямое влияние осадков гораздо весомее, чем остаточное влияние температуры и связанных с ней процессов на речной сток.

Определение морфометрических характеристик водосборов и построение карт проводилось с применением стандартных средств ГИС-обработки в ArcMap версии 10.4. ЦМР-покрытие территории было создано с использованием данных Shuttle Radar Topography Mission (SRTM – http://srtm.csi.cgiar.org/). Описание методики и характеристика данных приведена в [Гарцман, 2014].

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлено распределение значений коэффициента эластичности стока *e* (1) по территории бассейна р. Амур за паводкоопасный период (июнь–сентябрь). Их размах достаточно велик: от 0.35 до 3.86 (см. таблицу). Разделим полученные значения на три условные группы эластичности стока: «отрицательная» ($e < 1.00$), «умеренно положительная» ($1.01 \leq e \leq 2.00$) и «существенно положительная» ($e \geq 2.01$). Тогда в них попадет 4, 31 и 17 водосборов соответственно.

Более высокие оценки *e* сосредоточены на реках Приморского и Хабаровского краев, левобережье Амура характеризуется относительно меньшими значениями. «Отрицательная» эластичность наблюдается на трех реках, относящихся к Среднему Амуру – Берея (0.66), Малая Пера (0.35), Тюкан (0.82), и на одной в нижнем течении – Кичмари (0.91).

Полученные оценки в целом соответствуют приведенным в литературе. К примеру, в [Chiew, 2006] коэффициент эластичности стока составляет в среднем 2.5–3.0 по отношению к 219 водосборам в Австралии, 1.5–2.5 для 1553 водосборов в США [Sankarasubramanian, Vogel, 2003], 0.4–3.1 для 521 водосбора по всему миру [Chiew et al., 2006], 1.6–3.9 для 89 водосборов Китая [Yang H., Yang D., 2011], около 2.0 для бассейна Сунгари (правобережный приток Амура) [Zhou et al., 2015], 1.1–1.8 в речных бассейнах Южной Кореи, расположенных в непосредственной близости от бассейна Амура [Kim et al., 2013]. Расчеты с помощью математических моделей климата и формирования стока показали[1], что на соседнем водосборе р. Селенга увеличение осадков на 10 % в среднем приводит к росту стока на 20 % ($e \approx 2.0$).

Для бассейна Амура известно относительно небольшое количество работ схожей тематики. В [Гельфан и др., 2018] на основе гидрологического моделирования и данных климатических моделей сделан вывод, что в XXI в. рост стока может превысить рост осадков в два раза, т.е. $e \approx 2.0$. В бассейне р. Уссури – створ у пос. Кировский, на основе данных до 2013 г., *e* принимает значения 1.2–3.3 [Гарцман, Лупаков, 2019]. В настоящей работе ряд данных на 5 лет больше, включены значимые паводки в 2016 и 2018 гг. Однако значения коэффициента эластичности практически не изменились, что указывает на относительную стабильность оценок. На основе данных глобальных климатических моделей на XXI век оценки роста суммарного слоя стока за июнь–сентябрь по отношению к росту осадков составили 132–153 %, т.е. коэффициент эластичности принимает значения в пределах 1.3–1.5 по бассейну р. Уссури – пос. Кировский [Гарцман, Лупаков, 2019].

Полученные в настоящей работе данные свидетельствуют также о непропорциональном отклике стока рек бассейна Амура на увеличение осадков. Этот эффект описан в литературе [Гарцман, 2008], и обычно его связывают с уменьшением разнообразных потерь (на заполнение бессточных понижений, снижение эффекта перехвата осадков кронами

[1]Миллионщикова Т.Д. **2019**. Моделирование и предвычисление многолетних изменений стока р. Селенги: дис. ... канд. геогр. наук. Москва, Институт водных проблем РАН, 133 с.

Millionshikova T.D. **2019**. Simulation and precomputation of long-term changes in the Selenga River runoff: Cand. diss. in geographic sciences. Moscow, Water Problems Institute of the RAS, 133 p.

деревьев, суммарное испарение и т.п.) при валовом росте количества осадков. Положительные значения коэффициента эластичности практически по всем исследуемым объектам заметно отличаются от 1 (за исключением двух рек Хабаровского края – Манома и Беренджа), что подчеркивает нелинейный характер местных процессов стокоформирования.

Отрицательная эластичность объясняется в первую очередь учетом в уравнении (1) только осадков, в то время как параллельные изменения остальных факторов в отдельных случаях могут быть более значимыми. По-видимому, с этим связаны две наименьшие оценки коэффициента эластичности стока – рек Берея (0.66) и Малая Пера (0.35). Учитывая самые низкие оценки слоя стока, а также значимую разгрузку подземных вод [Мордовин, 1996], можно предположить, что в этих бассейнах большую часть гидрографа в теплый период составляют грунтовые воды, на которые выпадающие дожди оказывают влияние с большой задержкой, что, в свою очередь, скажется на стоке в замыкающем створе гораздо позже. Альтернативным объяснением может служить существенная доля снегового питания, что, как показано в [Barrera et al., 2020], также снижает эластичность стока. В обоих случаях параллельный рост температур (испарение) оказывает более значимое влияние на водный баланс водосборов.

Исследование связи значений коэффициента эластичности и таких бассейновых характеристик, как среднемноголетние значения стока и осадков, коэффициент стока, морфометрические и ландшафтные параметры, выявило некоторые интересные моменты. Если анализировать все объекты совместно, теснота связи на основе $R^2 \approx 0$ во всех случаях. В первую очередь это объясняется различиями в характере увлажнения на достаточно большой территории, что совпадает с результатами анализа глобального масштаба [Chiew et al., 2006], где общая форма обсуждаемых зависимостей достаточно сильно размыта.

В таком случае уместно разделить выборку исследуемых водосборов. Относительно тесные связи значений *e* с характеристиками речных бассейнов были найдены только в пределах р. Уссури с замыкающим створом у пос. Кировский (юго-восток бассейна Амура, Приморский край). Эта территория характеризуется постепенной сменой ландшафтных условий от верховьев к более равнинным территориям, примыкающим к замыкающему створу, т.е. охватывает различные условия стокоформирования при относительно небольшой разнице в климатических характеристиках. Кроме того, наблюдательная сеть в рассматриваемом районе наиболее плотная (рис. 1).

Максимальная теснота связи наблюдается при сравнении значений коэффициента эластичности со среднемноголетним значением слоя и коэффициента стока, средней высотой водосборов, средними уклонами водосборов и речной сети (рис. 2). R^2 связей находится в диапазоне от 0.52 до 0.72, коэффициенты корреляции статистически значимы (p = 0.01). Сходный результат получен применительно к данным по Болгарии [Seymenov, 2020] и частично по Южной Корее [Kim et al., 2013].

Анализируемые характеристики, очевидно, взаимосвязаны, что выражается в схожести

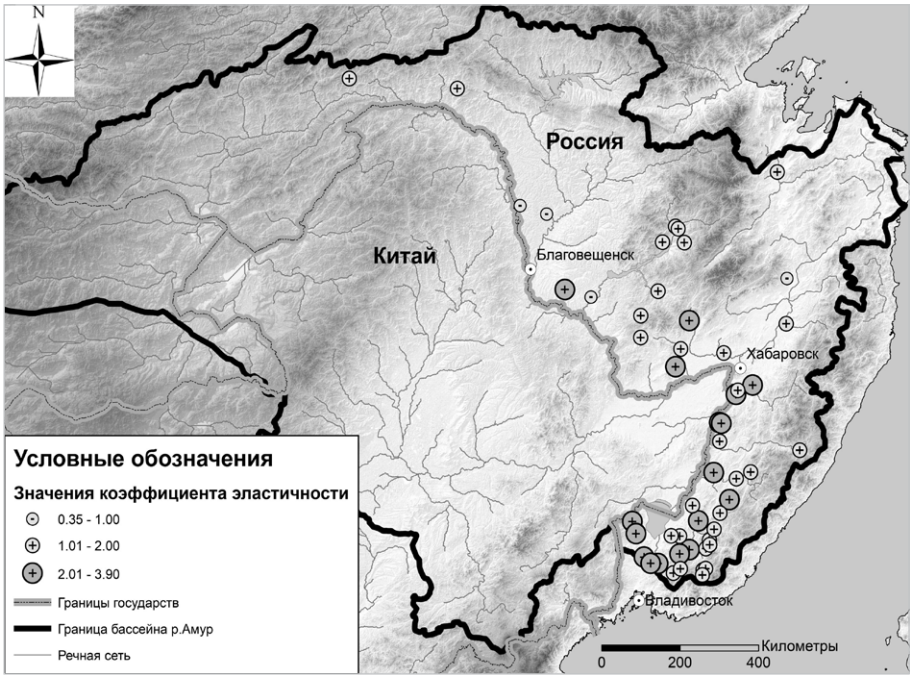


Рис. 1. Пространственное распределение оценок эластичности стока на исследуемой территории.

Figure 1. Spatial distribution of the estimates of runoff elasticity in the studied territory.

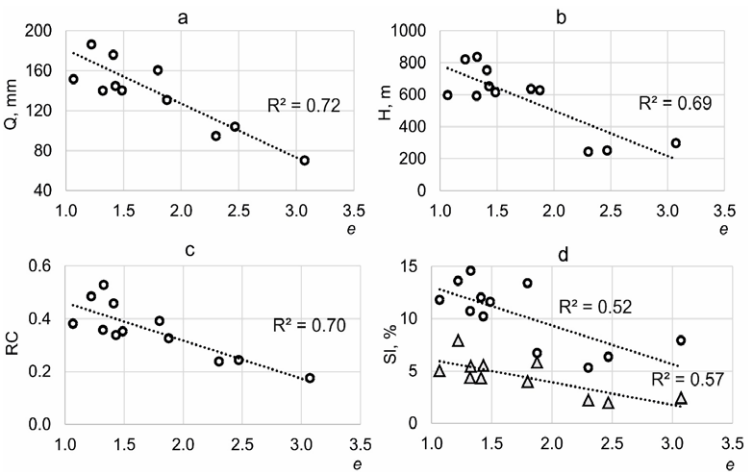


Рис. 2. Связи для бассейна р. Уссури – пос. Кировский значений коэффициента эластичности стока *e* и среднемноголетних значений слоя стока Q за июнь–сентябрь (a), средней высоты водосборов H (b), среднемноголетнего коэффициента стока RC за июнь–сентябрь (c), средних уклонов Sl водосборов (точки) и речной сети (треугольники) – (d).

Figure 2. Correlation for the Ussuri River basin – Kirovsky settlement between the values of the runoff elasticity coefficient *e* and long-term average annual values of the runoff layer Q for June-September (a), catchments elevation H (b), long-term average annual runoff coefficient RC for June–September (c), average catchments slopes Sl (dots) and river network (triangles) – (d).

поля точек на графиках (рис. 2). В данном случае, чем ниже высотные отметки и уклоны водосборов, тем выше потери стока (ниже коэффициент стока) и меньше его суммарный сезонный слой. Локальная специфика подстилающей поверхности играет важную роль в плане связи отклика речных бассейнов на изменение количества осадков. Водосборы с бóльшими высотными отметками (группа точек с диапазоном коэффициента эластичности от 1.0 до 1.8 на рис. 2) сложены сильно проницаемыми породами, на которых развиты относительно маломощные почвы, характеризующиеся быстрым водообменом и обеспечивающие быструю инфильтрацию влаги в нижние слои [Бугаец и др., 2015]. Это затрудняет образование поверхностного стока, формирующего наиболее мощные паводки и значимую долю сезонного стока. Наоборот, для выположенных водосборов с тяжелым механическим составом почв характерно более быстрое переувлажнение верхнего горизонта при том же количестве атмосферных осадков. На основании этого можно заключить, что фиксированное увеличение объема выпадающих дождей (в %) вызывает разную реакцию речных бассейнов, в том числе в плане скорости формирования поверхностного стока.

Выводы

На основе коэффициента эластичности в пределах бассейна р. Амур проведена оценка изменения стока при соответствующем изменении в количестве атмосферных осадков за летне-осенний паводкоопасный период. Значения коэффициента эластичности, полученные на основе анализа данных наблюдений, достаточно широко варьируют (0.35–3.86), однако в подавляющем количестве случаев (48 из 52) выше 1, что соответствует диапазону значений, приводимых в профильной литературе для объектов, расположенных в разных физико-географических условиях. Пространственная генерализация полученных оценок затруднена в силу низкой плотности наблюдательной сети в отдельных районах бассейна р. Амур. Однако общая тенденция прослеживается в виде непропорционального отклика сезонного слоя стока на рост количества осадков. При увеличении объемов дождей на 1 % объемы сезонного стока увеличиваются на 1.02–3.86 %. Этот вывод подтверждается независимыми расчетами с применением математических моделей формирования стока и данных современных глобальных климатических моделей и актуальных проекций климата. Таким образом, полученные оценки свидетельствуют о возможном увеличении паводковой опасности в регионе в будущем. Даже относительно небольшой рост количества осадков в рамках климатических изменений может привести к более существенному отклику речных систем на входное воздействие.

Связи значений коэффициента эластичности стока и некоторых бассейновых характеристик были найдены только в бассейне р. Уссури – пос. Кировский (Приморский край). Среди них: коэффициент стока, средняя высота, уклоны водосборов и средние уклоны речной сети, что связано с особенностями подстилающей поверхности водосборов и характером формирования стока.

Приложение Appendix

Таблица. **Анализируемые объекты и их некоторые характеристики**

Table. **Analyzed objects and some of their characteristics**

№	Река – Пост	Метеопункты	*S*	*Q*	*P*	*e*
1	Амазар – г. Могоча	Ерофей Павлович, Могоча	1020	155	331	1.85
2	Большой Невер – г. Сковородино	Сковородино, Джалинда	563	108	342	1.73
3	Берея – с. Саскаль	Саскаль, Шимановская	1940	61	372	0.66
4	Малая Пера – с. Сукромли	Шимановск, Свободный, Саскаль, Мазаново	913	60	390	0.35
5	Завитая – с. Михайловка	Завитая, Братолюбовка	2290	78	423	2.23
6	Бурея – с. Усть-Ниман	Софийский прииск, Усть-Ниман, Усть-Умальта	26500	336	502	1.02
7	Ниман – в 12км от устья	Софийский прииск, Чегдомын	14500	334	493	1.07
8	Чегдомын – пос. Чегдомын	Чегдомын, Усть-Умальта	910	333	497	1.34
9	Тырма – у ж.-д. моста	Сутур, Верховье Урми	6550	238	508	1.15
10	Яурин – пос. Таланджа	Биракан, Таланжа	3130	203	485	1.02
11	Туюн – в 9.0 км ниже устья Талибджан	Чекунда	2990	312	477	1.07
12	Тюкан – клх «Герой Труда»	Малиновка, Завитая	495	116	434	0.82
13	Малая Бира – с. Алексеевка	Бира, Ленинское	1120	136	497	2.59
14	Кульдур – ст. Известковая	Облучье, Биракан	1080	339	512	1.58
15	Икура – г. Биробиджан	Бира, Биробиджан	155	216	560	1.27
16	Беренджа – метеост. Урми	Урми, Верховье Урми	1050	332	814	2.12
17	Тунгуска – с. Архангеловка	Смидович, Верховье Урми	29400	277	725	1.68
18	Илистая – с. Ивановка	Ивановка, Виноградовка	901	73	385	2.36
19	Абрамовка – с. Абрамовка	Абрамовка, Халкидон, Полтавка, Пограничный	839	79	395	2.74
20	Осиновка – с. Осиновка	Осиновка, Ивановка, Приморская	289	58	389	2.03
21	Комиссаровка – пос. Дворянка	Дворянка, Ильинка, Пограничный	1170	105	394	2.65
22	Молоканка – с. Жариково	Жариково, Хороль, Ильинка, Астраханка	390	127	368	2.51
23	Уссури – с. Верхняя Бреевка	Ясное, Верхняя Бреевка	1840	176	385	1.41
24	Извилинка – пос. Извилинка	Ясное, Верхняя Бреевка, Извилинка	1160	202	382	1.33
25	Арсеньевка – пос. Виноградовка	Виноградовка, Воробей, Шкотово	940	144	428	1.43
26	Муравейка – пос. Гродеково	Гродеково, Анучино, Виноградовка, Верхняя Бреевка	761	140	392	1.32
27	Правая Поперечка – пос. Архиповка	Архиповка, Ясное, Верхняя Бреевка	223	186	385	1.22
28	Спасовка – г. Спасск-Дальний	Спасск-Дальний, Свиягино, Арсеньев	325	80	456	1.17
29	Одарка – с. Нововладимировка	Спасск-Дальний, Яковлевка	91	103	490	1.48
30	Каменка – с. Каменка	Каменка, Чугуевка	138	160	410	1.80
31	Павловка – с. Уборка	Антоновка, Кавалерово	3360	151	397	1.07
32	Тихая – с. Чернышевка	Анучино, Чернышевка, Варфоломеевка	580	94	398	2.30
33	Варфоломеевка – с. Варфоломеевка	Варфоломеевка, Гродеково	256	70	401	3.07
34	Крыловка – с. Крыловка	Самарка (Журавлевка), Ариадное	1070	104	426	2.47
35	Откосная – с. Самарка	Самарка (Журавлевка), Кокшаровка, Ариадное	1030	106	409	1.14
36	Уссури – с. Кокшаровка	Каменка, Павловка, Извилинка, Верхняя Бреевка, Чугуевка	9340	140	399	1.49
37	Уссури – пос. Кировский	Ясное, Гродеково, Анучино, Виноградовка, Варфоломеевка, Самарка (Журавлевка), Ариадное, Каменка, Антоновка, Кавалерово, Извилинка, Чугуевка, Яковлевка, Кировский	24400	131	402	1.88
38	Малиновка – с. Ариадное	Ариадное, Самарка (Журавлевка)	1180	148	426	1.70
39	Ореховка – пос. Поляны	Поляны, Ариадное, Малиново, Мельничное	508	213	430	2.49

№	Река – Пост	Метеопункты	*S*	*Q*	*P*	*e*
40	Маревка – пос. Покровка	Рощино, Глубинное, Красный Яр	1910	170	523	3.86
41	Большая Уссурка – с. Рощино	Мельничное, Глубинное, Рощино, Молодежное, Восток, Ариадное, Красный Яр	18700	222	483	1.47
42	Дальняя – с. Глубинное	Глубинное, Родниковая, Красный Яр, Молодежное	2740	308	514	1.13
43	Светловодная – пос. Охотничий	Охотничий, Золотой, Сосуново, Терней	2010	173	435	1.06
44	Бикин – ст. Звеньевой	Красный Яр, Охотничий, Родниковая	21400	200	483	1.45
45	Горбун – с. Пушкино	Лермонтовка, Вяземская	143	126	673	2.43
46	Бира – с. Лермонтовка	Лермонтовка, Вяземская	728	169	673	2.66
47	Кия – с. Марусино	Гвасюги, Бичевая	505	187	877	2.64
48	Подхоренок – пос. Дормидонтовка	Вяземский, Переяславка, Бичевая	2330	147	724	2.34
49	Хор – пгт Хор	Бичевая, Сукпай, Гвасюги, Хор	24500	320	812	1.34
50	Манома – с. Манома 1-я	Анюй, Троицкое	2220	238	627	1.24
51	Кичмари – с. Малмыж	Комсомольск-на-Амуре, Троицкое	62	156	573	0.91
52	Упагда – с. Упагда	Бурукан, Веселая Горка, им. Полины Осипенко	1120	155	521	1.61

Примечание. S – площадь водосбора, км^2; *Q* – среднемноголетний сезонный сток, мм; *P* – среднемноголетние сезонные осадки, мм; *e* – коэффициент эластичности стока.

Note. S – catchment area, km^2; *Q* – long-term average seasonal runoff, mm; *P* – long-term average seasonal precipitation, mm; *e* – elasticity coefficient.

Список литературы

1. Бугаец А.Н., Пшеничникова Н.Ф., Терешкина А.А., Краснопеев С.М., Гарцман Б.И. Анализ пространственной дифференциации почвенного покрова юга Приморья на примере бассейна р. Комаровка. **2015.** *Почвоведение*, 3: 268–276. https://doi.org/10.7868/S0032180X15030028

2. Гарцман Б.И. **2008**. *Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска*. Владивосток: Дальнаука, 223 с.

3. Гарцман Б.И. **2014.** Опыт гидрографического и ландшафтного описания речного бассейна на основе ГИС и геоданных. *Метеорология и гидрология*, 6: 67–79.

4. Гарцман Б.И., Галанин А.А. **2011.** Структурно-гидрографический и морфометрический анализ речных систем: теоретические аспекты. *География и природные ресурсы*, 3: 27–37.

5. Гарцман Б.И., Лупаков С.Ю. **2017.** Влияние изменений климата на максимальный сток в бассейне Амура: оценка на основе динамико-стохастического моделирования. *Водные ресурсы*, 44(5): 1–11. https://doi.org/10.7868/S0321059617050066

6. Гарцман Б.И., Лупаков С.Ю. **2019.** Оценка изменений режима паводкового стока реки Уссури с учетом современных климатических проекций до конца XXI века. *Гидросфера. Опасные процессы и явления*, 1(1): 51–69. https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.1.006

7. Гельфан А.Н., Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г. **2018.** Оценка изменений водного режима реки Амур в XXI веке при двух способах задания климатических проекций в модели формирования речного стока. *Водные ресурсы*, 45(3): 223–234. https://doi.org/10.7868/S032105961803001X

8. Мещенина Л.А., Новороцкий П.В., Пономарев В.И. **2007.** Климатические изменения и колебания стока Амура. *Вестник ДВО РАН*, 4: 44–54.

9. Мордовин А.М. **1996.** *Годовой и сезонный сток рек бассейна Амура*. Хабаровск: Ин-т водных и экологических проблем ХНЦ ДВО РАН, 72 с.

10. Новороцкий П.В. **2007.** Климатические изменения в бассейне Амура за последние 115 лет. *Метеорология и гидрология*, 2: 43–53.

11. Новороцкий П.В. **2011.** Современные климатические изменения в бассейне Амура и на побережье Японского моря. *Известия Русского географического общества*, 143(1): 41–48.

12. Новороцкий П.В. **2013.** Многолетние изменения температуры воздуха в бассейне реки Бурея. *География и природные ресурсы*, 2: 118–124.

13. Хон В.Ч., Мохов И.И. **2012.** Гидрологический режим бассейнов крупнейших рек Северной Евразии в XX–XXI вв. *Водные ресурсы*, 39(1): 3–12

14. Barrera C., Cobo J., Souvignet M., J., Oyarzun J., Oyarzun R. **2020.** Streamflow elasticity, in a context of climate change, in arid Andean watersheds of north-central Chile. *Hydrological Sciences J.*, 65: 1707–1719. https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1770764

15. Chiew F. **2006.** Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia. *Hydrological Sciences J.*, 51(4): 613–625. https://doi.org/10.1623/hysj.51.4.613

16. Chiew F., Peel M.C., McMahon T., Siriwardena L. **2006.** Precipitation elasticity of streamflow in catchments across the world. In: *Climate Variability and Change: Hydrological Impacts*. Wallingford, UK: IAHS Press, 256–262.

17. Chiew F., Potter N.J., Vaze J., Petheram C., Zhang L., Teng J., Post D.A. **2013.** Observed hydrologic non-stationarity in far south-eastern Australia: implications for modelling and prediction. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28: 3–15. https://doi.org/10.1007/s00477-013-0755-5

18. *IPCC: Climate Change 2013 – The Physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. **2013.** Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1535 p.

19. Kim B.S., Hong S.J., Lee H.D. **2013.** The potential effects of climate change on streamflow in rivers basin of Korea using rainfall elasticity. *Environmental Engineering Research*, 18(1): 9–20. https://doi.org/10.4491/eer.2013.18.1.009

20. Krysanova V., Hattermann F.F. **2017.** Intercomparison of climate change impacts in 12 large river basins: overview of methods and summary of results. *Climatic Change*, 141: 363–379. https://doi.org/10.1007/s10584-017-1919-y

21. Sankarasubramanian A., Vogel R. **2003.** Hydroclimatology of the continental United States. *Geophysical Research Letters*, 30(7). p. 1363. https://doi.org/10.1029/2002gl015937

22. Sankarasubramanian A., Vogel R., Limbrunner J. **2001.** Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resources Research*, 37(6): 1771–1781. https://doi.org/10.1029/2000WR900330

23. Seymenov K. **2020**. Climate elasticity of annual streamflow in Northwest Bulgaria. In: S. Nedkov et al. (eds). *Smart Geography. Key Challenges in Geography (EUROGEO Book Series)*. Cham: Springer Intern. Publ., 105–115.

24. Yang H., Yang D. **2011.** Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff. *Water Resources Research*, 47(7): W07526. https://doi.org/10.1029/2010WR009287

25. Zhou X., Zhang Y., Yang Y. **2015.** Comparison of two approaches for estimating precipitation elasticity of streamflow in China's main river basins. *Advances in Meteorology*, 2015: 1–8. https://doi.org/10.1155/2015/924572

References

1. Bugaets A.N., Pshenichnikova N.F., Tereshkina A.A., Krasnopeev S.M., Gartsman B.I. **2015.** Analysis of the spatial differentiation of the soil cover in the south of the Far East of Russia by the example of the Komarovka River basin. *Eurasian Soil Science*, 48(3): 231–239. https://doi.org/10.1134/s1064229315030023

2. Gartsman B.I. **2008.** [*Rain floods on rivers: methods of calculation, forecasts, risk assessments*]. Vladivostok: Dalnauka, 223 p. (In Russ.)

3. Gartsman B.I. **2014.** Hydrographic and landscape description of a river basin based on GIS- and geographic data. *Russian Meteorology and Hydrology*, 39(6): 407–415. https://doi.org/10.3103/S1068373914060077

4. Gartsman B.I., Galanin A.A. **2011.** Structural-hydrographic and morphometric analysis of river systems: Theoretical aspects. *Geography and Natural Resources*, 32(3): 226–234. https://doi.org/10.1134/s1875372811030048

5. Gartsman B.I., Lupakov S.Y. **2017.** Effect of climate changes on the maximal runoff in the Amur basin: estimation based on dynamic–stochastic simulation. *Water Resources*, 44(5): 697-706. https://doi.org/10.1134/S0097807817050062

6. Gartsman B.I., Lupakov S.Y. **2019.** Assessment of the Ussuri river flood regime changes regarding to climate projections to the end of the XXI century. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya* [*Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*], 1(1): 51–69. (In Russ.). https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.1.006

7. Gelfan A.N., Kalugin A.S., Motovilov Y.G. **2018.** Assessing Amur water regime variations in the XXI century with two methods used to specify climate projections in river runoff formation model. *Water Resources*, 45(3): 307–317. https://doi.org/10.1134/S0097807818030065

8. Meshchenina L.A., Novorotsky P.V., Ponomarev V.I. **2007.** Climatic changes and fluctuations of the Amur runoff. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 4: 44–54. (In Russ.).

9. Mordovin A.M. **1996.** [*Annual and seasonal river flow of Amur basin*]. Khabarovsk: Inst. of Water and Ecology Problems, Khabarovsk Research Center, FEB RAS, 72 p. (In Russ.)

10. Novorotskii P.V. **2007.** Climate changes in the Amur river basin in the last 115 years. *Russian Meteorology and Hydrology*, 32(2): 102–109. https://doi.org/10.3103/S1068373907020045

11. Novorotsky P.V. **2011.** Recent climatic changes in the basin of Amur river and on the shore of Sea of Japan. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 143(1): 41–48. (In Russ.).

12. Novorotsky P.V. **2013.** Long term changes of air temperature in the Bureya river basin. *Geography and Natural Resources*, 2: 118–124. (In Russ.).

13. Khon V.C., Mokhov I.I. **2012.** The hydrological regime of large river basins in Northern Eurasia in the XX–XXI centuries. *Water Resources*, 39(1): 1–10. https://doi.org/10.1134/S0097807812010058

14. Barrera C., Cobo J., Souvignet M., J., Oyarzun J., Oyarzun R. **2020.** Streamflow elasticity, in a context of climate change, in arid Andean watersheds of north-central Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 65: 1707–1719. https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1770764

15. Chiew F. **2006.** Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia. *Hydrological Sciences Journal*, 51(4): 613–625. https://doi.org/10.1623/hysj.51.4.613

16. Chiew F., Peel M.C., McMahon T., Siriwardena L. **2006.** Precipitation elasticity of streamflow in catchments across the world. In: *Climate Variability and Change: Hydrological Impacts*. Wallingford, UK: IAHS Press, 256–262.

17. Chiew F., Potter N.J., Vaze J., Petheram C., Zhang L., Teng J., Post D.A. **2013.** Observed hydrologic non-stationarity in far south-eastern Australia: implications for modelling and prediction. *Stoch. Env. Res. Risk A*., 28: 3–15. https://doi.org/10.1007/s00477-013-0755-5

18. *IPCC: Climate Change 2013 – The Physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. **2013.** Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1535 p.

19. Kim B.S., Hong S.J., Lee H.D. **2013.** The potential effects of climate change on streamflow in rivers basin of Korea using rainfall elasticity. *Environmental Engineering Research*, 18(1): 9–20. https://doi.org/10.4491/eer.2013.18.1.009

20. Krysanova V., Hattermann F.F. **2017.** Intercomparison of climate change impacts in 12 large river basins: overview of methods and summary of results. *Climatic Change*, 141: 363–379. https://doi.org/10.1007/s10584-017-1919-y

21. Sankarasubramanian A., Vogel R. **2003.** Hydroclimatology of the continental United States. *Geophysical Research Letters*, 30(7). p. 1363. https://doi.org/10.1029/2002GL015937

22. Sankarasubramanian A., Vogel R., Limbrunner J. **2001.** Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resources Research*, 37(6): 1771–1781. https://doi.org/10.1029/2000WR900330

23. Seymenov K. **2020**. Climate elasticity of annual streamflow in Northwest Bulgaria. In: S. Nedkov et al. (eds). *Smart Geography. Key Challenges in Geography (EUROGEO Book Series)*. Cham: Springer Intern. Publ., 105–115.

24. Yang H., Yang D. **2011.** Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff. *Water Resources Research*, 47(7): W07526. https://doi.org/10.1029/2010WR009287

25. Zhou X., Zhang Y., Yang Y. **2015.** Comparison of two approaches for estimating precipitation elasticity of streamflow in China's main river basins. *Advances in Meteorology*, 2015: 1–8. https://doi.org/10.1155/2015/924572

Об авторе

ЛУПАКОВ Сергей Юрьевич (ORCID 0000-0002-5804-2604), кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории гидрологии и климатологии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, rbir@mail.ru

About the Author

LUPAKOV Sergey Yur'evich (ORCID 0000-0002-5804-2604), Cand. of Sci. (Geography), Researcher of Laboratory of hydrology and climatology, Pacific Institute of Geography, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, rbir@mail.ru

Подписка на журнал «Геосистемы переходных зон» на 2021 год принимается всеми отделениями «Почты России».
Подписной индекс в Объединенном бумажном и интернет-каталоге «Пресса России» – 80882.

Полнотекстовые варианты статей доступны на сайтах:
журнала **http://journal.imgg.ru**;
научной электронной библиотеки (eLibrary)
https://elibrary.ru/title_about.asp?id=64191