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

# ГЕРЕХОДНЫХ ЗОН



# **GEOSYSTEMS** of Transition Zones



#### IV ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ»

#### г. Южно-Сахалинск, Сахалинская область 6–10 сентября 2021 г.



Приглашаем ученых и специалистов, аспирантов и студентов принять участие в конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы», которая состоится 6–10 сентября 2021 года в г. Южно-Сахалинск. В 2021 году ИМГиГ ДВО РАН исполняется 75 лет, и мы надеемся, что разделить этот праздник с нами смогут как наши старые друзья, так и ученые, ранее не посещавшие остров Сахалин. На конференции планируется обсуждение актуальных научных проблем, которые волнуют ученых не только Дальневосточного региона России. Среди них природные катастрофы, методы оценки их опасности и риска, а также современные технологии геофизического мониторинга в сейсмоактивных и цунамиопасных регионах.

#### НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СЕКЦИЙ КОНФЕРЕНЦИИ:

- Современная геодинамика и проблемы сейсмичности Дальнего Востока и Восточной Сибири.
- Геофизический мониторинг геодинамических процессов северо-западной части Тихого океана.
- Динамика моря.
- Современный вулканизм, методы наблюдений.
- Геолого-геоморфологические аспекты стратегии освоения ресурсов морских побережий Дальнего Востока и восточного сектора Арктики.
- Современные проблемы нефтегазового комплекса и пути их решения.
- Экологические проблемы и геоэкологические риски.

### Ha сайте конференции www.geopronh.com

#### открыта онлайн-регистрация для участия в конференции

В рамках конференции предусмотрены обзорные доклады и научно-популярные лекции для широкого круга слушателей, в том числе учащихся старших классов и студентов. К началу работы конференции будут изданы тезисы докладов. Объем тезисов не должен превышать одну страницу текста (правила оформления на странице https://www.geopronh.com/info).

Избранные доклады по решению организационного комитета конференции предполагается опубликовать в журнале «IOP Conference Series: Earth and Environmental Science», индексируемом в базе Scopus (будут изданы и проиндексированы в 2022 году), а также в журнале «Геосистемы переходных зон» (http://journal.imgg.ru), индексируемом РИНЦ и включенном в перечень ВАК.

Запланированы несколько однодневных экскурсий, которые позволят познакомиться с историей и природой о. Сахалин. Эти экскурсии не требуют дополнительной платы помимо организационного взноса. Уникальные для гостей нашего региона, но уже ставшие традиционными длительные полевые экскурсии будут платными. Просим выбрать наиболее интересную для Вас экскурсию при **онлайнрегистрации**. Экскурсии будут организованы при достаточном количестве участников. Необходима полевая одежда.

#### ПРЕДСЕДАТЕЛЬ

**Левин Борис Вульфович,** д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН, научный руководитель ИМГиГ ДВО РАН.

СО-ПРЕДСЕДАТЕЛИ:

Богомолов Леонид Михайлович, д.ф-м.н., директор ИМГиГ ДВО РАН. Долгих Григорий Иванович, д.ф.-м.н., проф., академик РАН, зам. председателя ДВО РАН.

Куркин Андрей Александрович, д.ф.-м.н., проф., проректор НГТУ им Р.Е. Алексеева по науке.

Сергиенко Валентин Иванович, академик РАН, председатель ДВО РАН.

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

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

#### ЗАМЕСТИТЕЛИ СО-ПРЕДСЕДАТЕЛЕЙ:

Закупин Александр Сергеевич, к.ф.-м.н., в.н.с., ИМГиГ ДВО РАН. Ковалев Дмитрий Петрович, д.ф.-м.н., в.н.с., ИМГиГ ДВО РАН. Прытков Александр Сергеевич, к.ф.-м.н., в.н.с., ИМГиГ ДВО РАН.

#### УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ:

Андреева Марина Юрьевна, к.ф.-м.н., с.н.с. ИМГиГ ДВО РАН.

	ОСНОВНЫЕ ДАТЫ:
до 1 ИЮЛЯ 2021 г.	— ЗАЯВКА НА УЧАСТИЕ В КОНФЕРЕНЦИИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ
	ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ.
до 1 АВГУСТА 2021 г.	— ТРЕТИЙ ЦИРКУЛЯР.

Оптимальные варианты проживания в Южно-Сахалинске, приемлемые по соотношению цены и качества:

Гостиница Рыбак Ул. Карла Маркса, 51 Тел.: +7(4242)72-37-68, +7(4242) 72-27-12 эконом вариант Гостиница Панорама Просп. Мира, 231 Тел.: +7(4242)70-08-88 panorama-hotel.ru Гостиница Лотос Курильская ул., 41А Тел.: +7(4242)43-09-18, +7(4242) 43-68-85 lotus-hotel.ru

АДРЕС ОРГКОМИТЕТА:

Гостиница Ленина-отель Ул. Ленина, 35 Тел.: +7(984)139-98-23 nalenina.com

Web-страница конференции:

www.geopronh.com

Гостиница Монерон Коммунистический пр-т, д. 86 +7(4242)72-34-53 moneron.biz

эконом вариант



Телефон/факс: 8 (4	4242) 79-15-17	E-mail: geopronh	n@imgg.ru	回热堆
ОРГАНИЗАТОР	СО-ОРГАНИЗАТОРЫ	I Contraction of the second	ФИНАНСО	ВАЯ ПОДДЕРЖКА
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН	Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН	Сахалинский государственный университет	Международный консорциум «Сахалин-1»	Питомник растений МИП ООО "Магнолия Парк"
			-1	

#### **IV ALL-RUSSIAN SCIENTIFIC CONFERENCE** WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION «GEODYNAMICAL PROCESSES AND NATURAL HAZARDS»

#### YUZHNO-SAKHALINSK, SAKHALIN REGION

6-10 SEPTEMBER. 2021



We are delighted to invite scientists and specialists, postgraduate students and students to participate in the "Geodynamic processes and natural hazards" conference that will be held on 6-10 September, 2021 in Yuzhno-Sakhalinsk. In 2021 IMGG FEB RAS turns 75, and we hope that both our old friends and scientists, who have not previously visited Sakhalin Island, will be able to share this celebration with us. The conference aims to discuss actual scientific problems that concern not only the scientists of the Russian Far East, including natural disasters, their hazard and risk assessment, as well as recent technologies of geophysical monitoring in seismically active areas and regions of high tsunami risk.

#### SCIENTIFIC TOPICS OF THE CONFERENCE SECTIONS:

- Modern geodynamics and problems of seismicity in the Far East and Eastern Siberia.
- Geophysical monitoring of geodynamic processes of the northwestern part of the Pacific Ocean.
- Sea dynamics.
- Recent volcanism, observation methods. •
- Geological and geomorphological aspects of the strategy for the development of resources of the sea coasts of the Far East and the eastern sector of the Arctic.

#### Modern problems of the oil and gas complex and their solutions.

Environmental problems and geo-ecological risks.

#### Online registration for the conference participation is now open on the www.geopronh.com conference website

Within the framework of the conference, review reports and popular science lectures will be arranged for a broad audience, including senior pupils and students. The abstracts will be published by the start of the conference. The abstracts should not be more than one page in typescript (guidelines are available on the page https://www.geopronh.com/info).

Reports selected by decision of the Organizing Committee of the conference are supposed to be published in the «IOP Conference Series: Earth and Environmental Science», indexed in the Scopus database, as well as in the «Geosystems of Transition Zones» Journal (http:// journal.imgg.ru) indexed by the RSCI and included in the HAC.

Several one-day trips are scheduled, which give an opportunity to become acquainted with the history and nature of Sakhalin Island. These trips do not require additional payment beyond the registration fee. Long time field excursions, unique for the guests of our region, but already became traditional, will be paid. Please choose the excursion most interesting for you when registering online. Excursions will be organized provided sufficient number of requests from the participants. Field clothing required.

#### CHAIRMAN:

Boris W. Levin, Dr. Sci. in Phys. and Math, Professor, Corresponding Member of the RAS, Scientific Supervisor of the IMGG FEB RAS.

#### **CO-CHAIRMANS:**

Leonid M. Bogomolov, Dr. Sci. in Phys. and Math., director of the IMGG FEB RAS.

Grigory I. Dolgikh, Dr. Sci. in Phys. and Math, Professor, Academician of the RAS, Vice-Chairman of the FEB RAS.

Andrey A. Kurkin, Dr. Sci. in Phys. and Math, Professor, Vice-Rector of the NNSTU n.a. R.E. Alekseev.

Valentin I. Sergienko, Academician of the RAS, Chairman of the FFB RAS.

VICE CO-CHAIRMANS:

Alexander S. Zakupin, Cand. Sci. in Phys. and Math., Leading Researcher, IMGG FEB RAS

Dmitry P. Kovalev, Dr. Sci. in Phys. and Math, Leading Researcher, IMGG FEB RAS.

Alexander S. Prytkov, Cand. Sci. in Phys. and Math., Leading Researcher, IMGG FEB RAS.

#### SCIENTIFIC SECRETARY:

Marina Yu. Andreeva, Cand. Sci. in Phys. and Math., Senior Researcher, IMGG FFB RAS.

MAIN up to 1 JULY, 2021 - THE APPLICATION FOR PARTICIPATION AND ABSTRACTS SUBMISSION DATES up to 1 AUGUST, 2021 - THE THIRD CIRCULAR

Optimal accommodation options in Yuzhno-Sakhalinsk reasonable in terms of quality-price:

Rybak Hotel Karl Marx Str. 51 Tel.: +7(4242)72-37-68, +7(4242) 72-27-12 economy class

Panorama Hotel Mira Av., 231 Tel.: +7(4242)70-08-88 panorama-hotel.ru

Lotos Hotel Kurilskava Str., 41A Tel.: +7(4242)43-09-18, 7(4242) 43-68-85 lotus-hotel.ru

Lenina Hotel Lenina Str., 3В Телефон: +7(984)139-98-23 nalenina.com

Moneron Hotel Kommunistichesky Av., 86 Телефон: +7(4242)72-34-53 moneron.biz economy class



**ORGANIZING COMMITTEE ADDRESS:** 

Russia, 693022, Yuzhno-Sakhalinsk, Nauki Str., 1 B Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS Phone/fax: 8 (4242) 79-15-17

Conference webpage: www.geopronh.com

E-mail: geopronh@imgg.ru FINANCIAL SUPPORT





ORGANIZER

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS



CO-ORGANIZERS





Геосистемы переходных зон

Январь – Март

## January – March

#### Научный журнал

Tom 5 № 1 2021

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

Издается с 2017 г. Периодичность издания 4 раза в год

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

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

Журнал включен в международную базу научных журналов открытого доступа – Directory of Open Access Journals (DOAJ)

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

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук, по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 25.00.01. Общая и региональная геология (геолого-минералогические)
- 25.00.03. Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические)
- 25.00.04. Петрология, вулканология (геолого-минералогические)
- 25.00.10. Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых
  - (геолого-минералогические; физико-математические)
- 25.00.25. Геоморфология и эволюционная география (географические)
- 25.00.28. Океанология (географические; геолого-минералогические; физико-математические)
- 25.00.35. Геоинформатика (геолого-минералогические; физико-математические)
- 25.00.36. Геоэкология (геолого-минералогические; географические)
- 01.02.04. Механика деформируемого твердого тела (физико-математические; технические)

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

Адрес учредителя и издателя ИМГиГ ДВО РАН ул. Науки, 1б, Южно-Сахалинск, 693022 Тел./факс: (4242) 791517 E-mail: gtrz-journal@mail.ru Сайт: http://www.journal.imgg.ru The journal is indexed and archived in: Russian Index of Scientific Citations (RISC)

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.

Journal is included in the Directory of Open Access Journals (DOAJ)

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

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

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

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

Postal address

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

#### 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

**GEOSYSTEMS OF TRANSITION Z** 

Vol. 5 No 1 2021

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

#### Редакционная коллегия

#### **Editorial Board**

#### Главный редактор

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

#### Переводчик Качесова Галина Сергеевна

#### Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

#### Геосистемы переходных зон

Том 5 № 1 2021 Январь – Март

https://doi.org/10.30730/gtrz-2021-5-1

#### Содержание

## Петрология. Вулканология

В.И. Бондаренко, В.А. Рашидов. Подводная га термальная активность в пределах Курильской о дуги

#### Геофизика. Сейсмология

#### ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

#### Океанология

НАУЧНАЯ СМЕНА	
О.А. Кораблев. О новом предикторе, влияющем н	а ледо-
образование в Охотском море	60

#### Геоинформатика

#### НАУЧНАЯ СМЕНА

<i>B</i> . <i>C</i> .	Никонов.	Алгоритм	обработки	площадей	льда	по
данн	ым дистан	ционного з	вондировани	ия Земли (н	а при	ме-
ре да	нных МА	SIE-NH)	-			.67

#### Хроника научной жизни

T	ретья Национальн	ая научно-	практическая ко	нференция
с	международным	участием	«Нефтегазовый	комплекс:
Π	роблемы й решени	тя»	-	

#### От редакции

Исправления	73
Правила оформления и публикации рукописей в	журнале
«Геосистемы переходных зон»	

ISSN 2713-2161 (Online)

#### GEOSYSTEMS OF TRANSITION ZONES Vol. 5 No 1 2021 January – March

https://doi.org/10.30730/gtrz-2021-5-1

#### CONTENT

Petrology and Volcanology	
V.I. Bondarenkol, V.A. Rashidov. Underwater gas-hydrother- mal activity within the Kuril island arc	азо-гидро- островной
4	4
й A.I. Kazakov, O.V. Veselov, D.N. Kozlov. Statistical analysis of the distribution of phreatic eruption products in the cal- dera of the Golovnin volcano (Kunashir Island, Kuril Is- lands)	стический о изверже- урильские 14
Geophysics. Seismology	
<i>A.S. Zakupin, N.V. Boginskaya.</i> Mid-term earthquake prediction using the LURR method on Sakhalin Island: A summary of retrospective studies for 1997–2019 and new approaches	прогнозы бобщение т. и новые 27
<ul> <li>I.P. Dudchenko, D.V. Kostylev, S.A. Gulyakov, N.S. Stovbun</li> <li>A geophysical pulse voltage generator for seismic and electric</li> <li>exploration of the subsurface46</li> </ul>	<i>I.C. Стов-</i> пряжений 46
LETTER TO THE EDITOR	
<ul> <li>Yu. L. Rebetsky On some aspects of the article «On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy»</li></ul>	«О сбро- Северной
Oceanology	
NEW SCIENTIFIC GENERATION	
<i>O.A. Korablev</i> On a new predictor affecting ice formation in the Sea of Okhotsk	м на ледо- 60
Geoinformatics	
NEW SCIENTIFIC GENERATION	
<ul> <li><i>V.S. Nikonov.</i> An algorithm for processing ice areas by Earth remote sensing data (by the example of MASIE-NH data)67</li> </ul>	й льда по на приме- 67
Current scientific events	
<ul> <li>Third National scientific and practical conference with</li> <li>international participation: «Oil and gas complex: problems</li> <li>and solutions»</li></ul>	нференция комплекс: 72
Editorial Note	
3 Corrections	73
Manuscripts' formatting and publication guidalings of the	

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.).

http://journal.imgg.ru

Редактор к.ф.н. Низяева Галина Филипповна Дизайн Леоненкова Александра Викторовна Компьютерная верстка Филимонкина Анна Александровна Корректор Качесова Галина Сергеевна Типография: 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 15. http://www.imgg.ru Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 9,8. Тираж 150 экз. Заказ 7946. Свободная цена. Подписано в печать 26.03.2021.

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 9,8. Number of copies 150. Order no. 7946. Free price. Date of publishing 26.03.2021. 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)

Памяти исследователя Курильской островной дуги Владимира Леонидовича Ломтева посвящается Dedicated to the memory of Vladimir L. Lomtev, a researcher of the Kuril island arc

УДК 550.8

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.004-013

# Подводная газо-гидротермальная активность в пределах Курильской островной дуги

© 2021 В. И. Бондаренко<sup>1</sup>, В. А. Рашидов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Костромской государственный университет, Кострома, Россия <sup>2</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия E-mail: <sup>1</sup>vibond@list.ru; <sup>2</sup>rashidva@kscnet.ru

**Резюме.** Важным элементом Тихоокеанской зоны перехода является Курильская островная дуга, в пределах которой происходят современные геологические процессы. Одним из таких процессов является подводная газо-гидротермальная деятельность. Изучение подводной газо-гидротермальной активности кроме фундаментального имеет и большое практическое значение, так как она оказывает непосредственное воздействие на природную среду и жизнедеятельность. В статье представлен обзор изученности подводной газо-гидротермальной активности Курильской островной дуги, приведены новые сведения о проявлениях подводной газо-гидротермальной деятельности в ее пределах, полученные в результате обработки, ревизии и анализа материалов комплексных вулканологических исследований с борта научно-исследовательского судна «Вулканолог» (1981–1991 гг.).

Ключевые слова: подводная газо-гидротермальная активность, Курильская островная дуга

#### Underwater gas-hydrothermal activity within the Kuril island arc

Vyacheslav I. Bondarenko<sup>1</sup>, Vladimir A. Rashidov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kostroma State University, Kostroma, Russia <sup>2</sup>Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia E-mail: <sup>1</sup>vibond@list.ru; <sup>2</sup>rashidva@kscnet.ru

**Abstract.** The Kuril island arc is an important element of the Pacific transition zone, within which such modern geological processes as underwater gas-hydrothermal activity occur. The study of underwater gas-hydrothermal activity, which affects the natural environment and all life activities, has not only fundamental but also a great practical importance. The article provides a review of research studies into the underwater gas-hydrothermal activity of the Kuril island arc. New information on the manifestations of underwater gas-hydrothermal activity within this zone obtained as a result of processing, revision and analysis of materials of complex volcanological shipboard studies at the *Volcanolog* research vessel (1981–1991) is presented.

Keywords: underwater gas-hydrothermal activity, Kuril island arc

Для цитирования: Бондаренко В.И., Рашидов В.А. Подводная газо-гидротермальная активность в пределах Курильской островной дуги. *Геосистемы переходных зон*, 2021, 5(1), с. 4–13.

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.004-013

*For citation:* Bondarenko V.I., Rashidov V.A. Underwater gas-hydrothermal activity within the Kuril island arc. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, 5(1), pp. 4–13. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.004-013

#### Введение

Ha охотоморском склоне Курильской островной дуги (КОД) – единственной островной дуги, полностью находящейся в пределах Российской Федерации, в результате обработки и анализа материалов, полученных в 1981-1991 гг. в комплексных вулканологических экспедициях на НИС «Вулканолог» [Подводный вулканизм..., 1992], с учетом критического рассмотрения всех доступных литературных источников, к настоящему времени выявлено 126 подводных вулканов и 6 подводных или частично затопленных кальдер и кратеров вулканов.

В то же время единственным достоверным подводным извержением в пределах КОД является извержение побочного вулкана Такетоми в 1933–1934 гг. [Рашидов, 2013; Tanakadate, 1934], а сведения о подводной газо-гидротермальной активности в этом регионе (рис. 1), несмотря на более чем 70-летнюю историю изучения КОД, начавшуюся в 1949 г. [Безруков и др., 1958], весьма ограниченны [Авдейко и др., 1984; Авдейко, Краснов, 1985; Бондаренко, Надежный, 1987; Зоненшайн и др., 1987; Надежный, Бондаренко, 1989; Мельниченко и др., 1990; Гинзбург, Соловьев, 1994; Обжиров и др., 1999; Бондаренко, Рашидов, 2003, 2006, 2011, 2018а, 2018б; Ломтев, Патрикеев, 2012; Ломтев, 2014; Блох и др., 2020; Рашидов, Бондаренко, 2004].

Любая достоверная информация о подводных газопроявлениях и гидротермальной активности может служить, с одной стороны, важным поисковым признаком возможной генерации и формирования залежей



**Рис.** 1. Местоположение проявлений подводной газогидротермальной активности в пределах КОД. 1–10 – номера проявлений газо-гидротермальной активности в соответствии с таблицей.

**Figure 1.** Location of the manifestations of gas-hydrothermal activity within the Kuril island arc. 1–10 numbers of the manifestations of gas-hydrothermal activity according to the Table.

Hower	Коорд	инаты		
п/п	северная широта	восточная долгота	Глубина, м	Местоположение
1	50°30.8'	155°18.45'	700	Парамуширские гидроакустические аномалии
2	51°00.5'	155°35.1'	800	Северный подводный склон о. Атласова
3	47°31.4'	152°50.5'	30	Вулканический массив Ушишир
4	46°28'	150°50'	800	Вулканический массив Черных Братьев
5	48°18'	153°518'	400	Подводный склон о. Райкоке
6	45°16'	147°25'	250-210	Подводный вулкан Крылатка
7	45°25.1'	148°13.9'	500-100	Вулканический массив залива Простор
8	45°01'	147°01'	125	Подводный вулкан 8.10
9	44°53.2'	147°13.5'	120	Залив Одесский, о. Итуруп
10	44°03.8'	145°39.0'	70	Охотоморский склон о. Кунашир

Таблица. Проявления подводной газо-гидротермальной деятельности в пределах КОД Table. Manifestations of gas-hydrothermal activity within the Kuril island arc

углеводородов, в частности газовых гидратов и подгидратных газовых скоплений, с другой – индикатором возможных проявлений подводной вулканической активности и грязевулканической деятельности в пределах КОД, что, по нашему мнению, имеет большое значение и для фундаментальной науки, и для планирования в этом регионе мероприятий по защите населения от стихийных бедствий, оперативного оповещения морских и воздушных судов о возможных негативных последствиях.

#### Методы исследований

В комплекс вулканологических исследований, применяемых на НИС «Вулканолог», входили эхолотный промер, непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП), гидромагнитная съемка, драгирование и отбор проб донных осадков. Исследования проводились в два этапа. На первом этапе на ходу судна выполнялись профильные площадные исследования, а на втором – в выбранных точках отрабатывались станции геологического и газо-гидрохимического опробования. Навигационная привязка при работе в пределах КОД осуществлялась с помощью судовых радиолокаторов «Океан-21» и «Океан-23» по береговым ориентирам и с помощью спутниковой навигационной системы «Транзит» с приемником «FURUNO FSN-20 В» в комплекте с доплер-лагом «FURUNO MF-200» и приемоиндикатором радионавигационной системы «FURUNO FORM-3AP».

В результате 15-летних исследований (с 1977 по 1991 г.) в Тихом океане с борта НИС «Вулканолог» была разработана методика изучения современного подводного вулканизма, исследовано большое количество подводных вулканов, выявлены определенные критерии обнаружения неизвестных вулканических объектов геофизическими, гидрохимическими и газо-гидрохимическими методами.

Обнаружение новых подводных вулканических объектов происходило как при проведении планомерных площадных и рекогносцировочных геолого-геофизических исследований, так и при попутном эхолотном промере в вулканически активных районах Тихого океана [Бондаренко, 1990; Рашидов, 2010].

Нередко для этих целей проверяли сообщения капитанов судов о возможных проявлениях подводной вулканической деятельности. Проверка такого сообщения, полученного от капитана рыболовного траулера «Пограничник Змеев» 20.03.2082 г., стала началом изучения подводной газо-гидротермальной активности в пределах КОД [Авдейко и др., 1984]. Тогда в 13-м рейсе НИС «Вулканолог» на записях эхолота WD-110M 21.04.1982 г. в 6:54 по камчатскому времени учеными были впервые обнаружены акустические помехи в форме факела на запад-северо-западном подводном склоне о. Парамушир.

После 1994 г. рейсы научно-исследовательских судов, направленные на изучение подводной газо-гидротермальной активности КОД, к большому сожалению, не проводились [Мельниченко и др., 1990; Подводный вулканизм..., 1992; Gaedicke et al., 1997].

#### Результаты исследований

В северной тыловой части КОД, на западсеверо-западном склоне о. Парамушир, приблизительно посередине между вулканами Алаид (о. Атласова) и Ширинки (о. Анциферова), в период с 1982 по 1991 г. были выполнены многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых по изучению акустических аномалий, зафиксированных в водной толще в точке с координатами 50°30.8' с.ш. и 155°18.45' в.д. [Бондаренко, Рашидов, 2006]. По своей форме выявленные аномалии напоминали факелы или султаны (рис. 2), которые фиксировались от дна моря на глубине около 700 м до глубин 400–200 м.

По данным исследований 1982-1983 гг. в 13, 15 и 17-м рейсах НИС «Вулканолог», акустические аномалии приурочены к слабо проявленной вулканической зоне, косо ориентированной по отношению к КОД и представленной почти полностью погребенными экструзивными куполами или небольшими вулканическими конусами [Авдейко и др., 1984; Подводный..., 1992]. Первоначально было высказано предположение о газо-гидротермальной природе выявленных гидроакустических аномалий, а позднее - об их газовой природе и возможном развитии в данном районе в верхней части осадочного разреза процессов гидратообразования [Бондаренко, Надежный, 1987; Бондаренко, Рашидов, 2006].

В 1986 г. в рейсе 11<sup>а</sup> НИС «Мстислав Келдыш» морское дно в районе гидроакустических аномалий было обследовано с помощью подводного обитаемого аппарата «Пайсис» [Зоненшайн и др., 1987]. Во время этих исследований никаких гидротермальных источников выявлено не было, а в месте проявления гидроакустических аномалий были отмечены рассеянные выделения пузырьков газа, в основном метана, в водную толщу. При литологических исследованиях с глубины 3 м ниже морского дна были подняты газовые гидраты. Позднее газовые гидраты были подняты здесь и в 1991 г. в рейсе НИС «Геолог Петр Андропов» [Гинзбург, Соловьев, 1994].

В работах, опубликованных до 2006 г. [Авдейко и др., 1984; Зоненшайн и др., 1987; Гинзбург, Соловьев, 1994; и др.], рассматривались результаты изучения района обнаруженных гидроакустических аномалий на участке 2 × 1 км. В статье [Бондаренко, Рашидов, 2006] представлены результаты ис-

следований, выполненных в трех рейсах НИС «Вулканолог» на участке 38 × 22 км, когда были выявлены новые гидроакустические аномалии, установлен характер взаимосвязи аномалий с рельефом дна и строением осадочного чехла. Также был сделан вывод о том, что Парамуширские гидроакустические аномалии приурочены к долгоживущей зоне глубинных разломов на границе структур прогиба Атласова и Парамуширского островного блока, которая является активной, по крайней мере, с неогена. Активность в пределах выделенной зоны проявлялась в значительных вертикальных и горизонтальных движениях по разломам, вулканизме и газо-гидротермальной деятельности. Здесь же были обнаружены признаки грязевого вулканизма, приуроченные к газовыделениям в водную

толщу на границе обширной зоны гидратообразования в верхней части разреза [Бондаренко, Надежный, 1987; Надежный, Бондаренко, 1989; Бондаренко, Рашидов, 2006].

В северной части КОД в рейсах НИС «Академик Александр Несмеянов» в начале июня 1985 г. у основания северного подводного склона о. Атласова (вулкан Алаид) были выявлены акустические аномалии в виде трех звукорассеивающих «столбов воды» [Мельниченко и др., 1990]. Ревизия имеющихся материалов показала, что в этом месте акустические аномалии были зафиксированы ранее в 15-м рейсе НИС «Вулканолог» 04.09.1982 г. (рис. 3), но этому факту не было уделено должного внимания. Анализ имеющихся данных позволяет говорить о том, что газо-гидротермальная активность у основания северного подводного склона о. Атласова продолжалась по крайней мере три года.



Рис. 2. Парамуширские гидроакустические аномалии, зафиксированные на самописце эхолота WD-110M (центральная частота 12.5 кГц) 03.09.1985 г. в дрейфе НИС «Вулканолог».

**Figure 2.** Paramushir hydroacoustic anomalies recorded on 03.09.1985 by the WD-110M echograph (center frequency is 12.5 kHz) while the "Volcanolog" research vessel was set adrift.



Рис. 3. Акустические помехи в водной толще у основания северного подводного склона о. Атласова, зафиксированные на самописце эхолота WD-110M (центральная частота 12.5 кГц) 04.09.1982 г. на ходу НИС «Вулканолог».

**Figure 3.** Acoustic noise in the water column at the base of the northern slope of Atlasov Island recorded on 04.09.1982 by the WD-110M echograph (center frequency is 12.5 kHz) while the "Volcanolog" research vessel was under way.



Рис. 4. Акустические помехи в водной толще около о. Янкича, зафиксированные на самописце эхолота WD-110M (центральная частота 12.5 кГц) 29.08.1987 г. на ходу НИС «Вулканолог».

**Figure 4.** Acoustic noise in the water column in the vicinity of Yankich Island recorded on 29.08.1987 by the WD-110M echograph (center frequency is 12.5 kHz) while the "Volcanolog" research vessel was under way.

В центральной части КОД подводная газо-гидротермальная деятельность была зафиксирована в пределах вулканических массивов Ушишир и Черных Братьев [Бондаренко, 1990; Бондаренко, Рашидов, 2003, 2018а], а также у подводного основания о. Райкоке [Ломтев, Патрикеев, 2012; Ломтев, 2014].

В 1981-1991 гг. с борта НИС «Вулканолог» и с борта катамарана были выполнены комплексные исслелования вулканического массива Ушишир [Бондаренко, 1990, 2015; Бондаренко, Рашидов, 2018а], состоящего из двух островов -Рыпонкича и Янкича – и нескольких скал. В пределах о. Янкича находится затопленный кратер действующего вулкана Ушишир – бухта Кратерная, а эволюция массива происходила на протяжении 6 этапов [Бондаренко, 2015; Бондаренко, Рашидов, 2018а]. В результате выполненных исследований установлено, что подводная газо-гидротермальная активность наблюдается не только внутри бухты Кратерная, но и с тихоокеанской и охотоморской (рис. 4) сторон о. Янкича и приурочена к разломам и трещинам.

В 1982–1991 гг. в пяти вулканологических экспедициях НИС «Вулканолог» были выполнены геолого-геофизические исследования вулканического массива Черных Братьев, который прошел длительную и сложную историю развития [Бондаренко, Рашидов, 2003].

В 1987 г. в 29-м рейсе НИС «Вулканолог» в районе вулканического массива Черных Братьев на записях самописца эхолота были обнаружены

Геосистемы переходных зон 2021, 5 (1): 4 – 13

многочисленные акустические аномалии в водной толще, которые прослеживались на ряде взаимопересекающихся профилей в пределах кальдеры Горшкова [Бондаренко, Рашидов, 2003]. На профилях НСП, отработанных в райвулканического оне массива, во многих местах были выделены аномалии сейсмоакустического изображения – «яркие пятна», одной из причин появления которых может быть повышенная газонасыщенность разреза, обусловленная гидротермальной деятельностью Бондаренко, Надежный, 1987; Бондаренко Рашидов, 2003]. Над местами проявления акустических аномалий зафиксированы локальные участки повышения содержания ртути, растворенной в морской воде, которая



**Рис. 5.** Акустические помехи в водной толще над подводным вулканом Крылатка, зафиксированные на самописце эхолота WD-110M (центральная частота 12.5 кГц) 08.09.1987 г. на ходу НИС «Вулканолог».

**Figure 5.** Acoustic noise in the water column above the Krylatka submarine volcano recorded on 08.09.1987 by the WD-110M echograph (center frequency is 12.5 kHz) while the "Volcanolog" research vessel was under way.

является надежным индикатором выявления зон подводной гидротермальной разгрузки [Гавриленко, 1997]. Полученные результаты позволили предположить, что отмеченные акустические аномалии связаны с подводной газо-гидротермальной активностью [Бондаренко, Рашидов, 2003].

На профиле НСП, пересекающем основание подводного склона о. Райкоке, сахалинскими исследователями были выделены две амплитудно-скоростные аномалии и газовые столбы [Ломтев, Патрикеев, 2012; Ломтев, 2014].

В южной части КОД в четырех рейсах НИС «Вулканолог» был исследован подводный вулкан Крылатка [Рашидов, Бондаренко, 2004].

На записях эхолотных промеров, выполненных в 15, 29 и 34-м рейсах НИС «Вулканолог» в 1983, 1987 и 1989 гг. [Рашидов, Бондаренко, 2004], в центре плоской вершины подводного вулкана Крылатка в интервале глубин 250-210 м отмечены акустические аномалии в водной толще (рис. 5), а газогидрохимическими исследованиями 1987 г. в районе акустических помех зафиксированы аномальные содержания СО<sub>2</sub>. Основываясь на полученных результатах и учитывая то, что тыловая зона Южных Курил является перспективной для поиска подводных гидротерм [Авдейко, Краснов, 1985], было сделано предположение, что отмеченные акустические аномалии, которые фиксировались на



Рис. 6. Акустические помехи в водной толще в пределах вулканического массива залива Простор, зафиксированные на самописце эхолота WD-110M (центральная частота 12.5 кГц) 07.09.1987 г. на ходу НИС «Вулканолог».

**Figure 6.** Acoustic noise in the water column within the volcanic massif in the Prostor bay recorded on 07.09.1987 by the WD-110M echograph (center frequency is 12.5 kHz) while the "Volcanolog" research vessel was under way.

записях эхолотов в интервале 6 лет и всегда были приурочены к определенному участку плоской вершины подводного вулкана, вызваны газо-гидротермальной деятельностью.

Недавняя ревизия имеющихся материалов эхолотного промера и НСП показала, что проявление подводной газо-гидротермальной активности в южной части КОД более масштабное, чем было принято до сих пор считать.

Так, в пределах вулканического массива залива Простор (о. Итуруп) выявлены многочисленные акустические аномалии в водной толще (рис. 6), которые свидетельствуют о возможной гидротермальной деятельности в пределах этого массива [Бондаренко, Рашидов, 2019].

Аналогичные акустические аномалии отмечены над вершиной подводного вулкана 8.10 [Блох и др., 2020а] и в юго-западной части охотоморского склона о. Итуруп в районе зал. Одесский [Блох и др., 2020б], а также в югозападной части охотоморского склона о. Кунашир (рис. 7).



Рис. 7. Акустические помехи в водной толще в юго-западной части охотоморского склона о. Кунашир, зафиксированные на самописце эхолота WD-110M (центральная частота 12.5 кГц) 23.06.1989 г. на ходу НИС «Вулканолог».

**Figure 7.** Acoustic noise in the water column in the south-western part of the Sea of Okhotsk slope of Kunashir Island recorded on 23.06.1989 by the WD-110M echograph (center frequency is 12.5 kHz) while the "Volcanolog" research vessel was under way.

#### Заключение

Обобщена накопленная к настоящему времени информация о подводных газопроявлениях и гидротермальной активности в пределах Курильской островной дуги.

В результате обработки и анализа материалов комплексных вулканологических исследований с борта НИС «Вулканолог» (1981–1991 гг.) получены новые сведения о проявлениях подводной газо-гидротермальной деятельности в пределах КОД, которые актуальны и для решения такой важной прикладной задачи, как прогноз подводной вулканической активности.

Полученные данные, личный опыт работы авторов на действующих наземных вулканах и обобщение материалов по кратерным озерам Большой Курильской гряды, выполненное Д.Н. Козловым [Козлов, 2015], позволяют говорить о том, что проявления газо-гидротермальной активности в пределах КОД намного масштабнее, чем предполагалось ранее.

Геосистемы переходных зон 2021, 5 (1): 4 – 13

#### Список литературы

1. Авдейко Г.П., Краснов С.Г. **1985.** Сульфидные руды и их связь с подводными вулканами и гидротермами островных дуг. *Вулканология и сейсмология*, 4: 26–39.

2. Авдейко Г.П., Гавриленко Г.М., Черткова Л.В., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Гусева В.И., Мальцева В.И., Сазонов А.П. **1984.** Подводная газогидротермальная активность на северо-западном склоне о. Парамушир (Курильские острова). *Вулканология и сейсмология*, 6: 66–81.

3. Безруков П.Л., Зенкевич Н.Л., Канаев В.Ф., Удинцев Г.Б. **1958.** Подводные горы и вулканы Курильской островной гряды. *Тр. Лаборатории вулканологии*, 13: 71–88.

4. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А. **2020а.** Комплексные геолого-геофизические исследования подводных вулканов Центральных и Южных Курил. В кн.: Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 47-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. Воронеж, 27–30 января 2020 г. Воронеж: Научная книга, с. 41–44.

5. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А. **20206.** Новые данные о строении подводных вулканов Центральных и Южных Курил. В кн.: *Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (МАRESEDU-2020)»*. Тверь: ПолиПРЕСС, т. 3 (3): 482–485.

6. Бондаренко В.И. **1986.** Строение вулканической впадины бухты Кратерной (Курильские острова) по данным сейсмоакустических исследований. *Вулканология и сейсмология*, 5: 96–101.

7. Бондаренко В.И. **1990.** Строение подводных кальдер по данным сейсмоакустического профилирования (на примере Курильской островной дуги): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 24 с.

8. Бондаренко В.И. **2015.** Строение и предполагаемая история развития вулканического массива Ушишир (Центральные Курилы). В кн.: *Геология морей и океанов: Материалы XXI Междунар. науч. конф.* (Школы) по морской геологии. М.: ГЕОС, т. 5: 48–52.

9. Бондаренко В.И., Надежный А.М. **1987.** Акустические неоднородности осадочного чехла в районе предполагаемого газогидротермального выхода у о. Парамушир. *Вулканология и сейсмология*, 2: 100–104.

10. Бондаренко В.И., Рашидов В.А. **2003.** О возможной подводной вулканической активности в районе островов Черные Братья (Курильские острова). *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, № 2: 80–88.

11. Бондаренко В.И., Рашидов В.А. 2006. Погребенная подводная вулканическая зона к западу от о. Парамушир (Курильская островная дуга). Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2(8): 69–85.

12. Бондаренко В.И., Рашидов В.А. **2011.** Проявления гидратообразования и грязевого вулканизма в районе пролива Буссоль (Курильская островная дуга). В кн.: *Геология морей и океанов: Материалы XIX Междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии, Москва, 14–18 ноября 2011 г.* М.: ГЕОС, т. 5: 38–42.

13. Бондаренко В.И., Рашидов В.А. **2018а.** Строение вулканического массива Ушишир (Центральные Курилы). *Вулканология и сейсмология*, 1: 16–34.

14. Бондаренко В.И, Рашидов В.А. **20186.** Подводная вулканическая активность в пределах Охотоморского склона Курильской островной дуги. *Актуальные проблемы нефти и газа*, 4(23). https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art51

15. Бондаренко В.И., Рашидов В.А. **2019.** Подводная кальдера залива Простор, о. Итуруп, Курильские острова. В кн.: Геология морей и океанов: Материалы XXIII Междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии, Москва, 18–22 ноября 2019 г. М.: ИО РАН, т. 5: 54–57.

16. Гавриленко Г.М. Подводная вулканическая и гидротермальная деятельность как источник металлов в железо-марганцевых образованиях островных дуг. Владивосток: Дальнаука, 1997. 164 с.

17. Гинзбург Г.Д., Соловьев В.А. 1994. Субмаринные газовые гидраты. СПб: ВНИИОкеангеология, 199 с.

18. Зоненшайн Л.П., Мурдмаа И.О., Баранов Б.В., Кузнецов А.П., Кузин В.С., Кузьмин М.И., Авдейко Г.П., Стунжас П.А., Лукашин В.Н., Бараш М.С., Валяшко Г.М., Демина Л.Л. **1987.** Подводный газовый источник в Охотском море к западу от острова Парамушир. *Океанология*, 27(5): 795–800.

19. Козлов Д.Н. 2015. Кратерные озера Курильских островов. Южно-Сахалинск: Сахалинский обл. краевед. музей; ИМГИГ ДВО РАН, 112 с.

20. Ломтев В.Л. **2014.** К строению и газоносности кайнозойского чехла северного фланга Срединно-Курильского прогиба (по данным НСП). *Глубинная нефть*, 2(6): 953–968. URL: http://journal.deepoil.ru/ images/stories/docs/DO-2-6-2014/6\_Lomtev\_2-6-2014.pdf

21. Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. **2012.** Новое в строении северного фланга Срединно-Курильского прогиба (по данным НСП). Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2(20): 59–70.

22. Мельниченко Ю.И., Казанский Б.А., Обжиров А.И. **1990.** Гидроакустические эффекты при эхолотировании дна морских бассейнов. В кн.: *Новые данные по геоморфологии и геологии западной части Тихого океана*. Владивосток: ДВО АН СССР, с. 75–89. 23. Надежный А.М., Бондаренко В.И. **1989.** Газовые гидраты в прикамчатско-припарамуширской части Охотского моря. Доклады Академии наук, 306(5): 1192–1195.

24. Обжиров А.И., Астахова Н.В., Липкина М.И., Верещагина О.Ф., Мишукова Г.И., Сорочинская А.В., Югай И.Г. **1999.** *Газогидрохимическое районирование и минеральные ассоциации дна Охотского моря.* Владивосток: Дальнаука, 183 с.

25. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги (отв. ред. Ю.М. Пущаровский). **1992.** М.: Наука, 528 с.

26. Рашидов В.А. **2010.** Геомагнитные исследования при изучении подводных вулканов островных дуг и окраинных морей западной части Тихого океана: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Петропавловск-Камчатский, 27 с.

27. Рашидов В.А. 2013. Побочный вулкан Такетоми (о. Атласова, Курильская островная дуга). Геофизические процессы и биосфера, 12(1): 5–13.

28. Рашидов В.А., Бондаренко В.И. **2004.** Геофизические исследования подводного вулкана Крылатка (Курильская островная дуга). *Вулканология и сейсмология*, 4: 65–76.

29. Gaedicke C., Baranov B.V., Obzhirov A.I., Lelikov E.P., Belykh I.N., Basov E.I. **1997**. Seismic stratigraphy, BSR distribution and venting of metan-rich fluids west off Paramushir and Onekotan Islands, northern Kurils. *Marine Geology*, 136(3–4): 259–276. https://doi.org/10.1016/s0025-3227(96)00067-9

30. Tanakadate H. **1934.** Volcanic activity in Japan during the period between June 1931 and June 1934. *Japanese J. of Astronomy and Geophysics*, 12: 89–108.

#### References

1. Avdeiko G.P., Krasnov S.G. **1985.** Sulphide ores and their relationship to submarine volcanoes and hydrothermal waters of island arcs. *Volcanology and Seismology*, 4: 26–39.

2. Avdeiko G.P., Gavrilenko G.M., Chertkova L.V., Bondarenko V.I., Rashidov V.A., Guseva V.I., Mal'tseva V.I., Sazonov A.P. **1984.** Submarine gas-hydrothermal activity on the northwestern slope of the Paramushir Island, the Kurile. *Volcanology and Seismology*, 6: 61–81.

3. Bezrukov P.L., Zenkevich N.L., Kanaev V.F., Udincev G.B. **1958.** [Submarine mountains and volcanoes of the Kuril island arc]. *Trudy Laboratorii vulkanologii* [*Proceedings of the Laboratory of Volcanology*], 13: 71–88. (In Russ.).

4. Blokh Yu.I., Bondarenko V.I., Dolgal' A.S., Novikova P.N., Petrova V.V., Pilipenko O.V., Rashidov V.A., Trusov A.A. **2020.** [Complex geological and geophysical studies of submarine volcanoes of the Central and Southern Kuriles]. In: *Questions of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: Proceedings of the 47th session of the International Scientific Seminar named after D.G. Uspensky – V.N. Strakhov, Voronezh, January 27–30, 2020.* Voronezh: Scientific Book, p. 41–44. (In Russ.).

5. Blokh Yu.I., Bondarenko V.I., Dolgal' A.S., Novikova P.N., Petrova V.V., Pilipenko O.V., Rashidov V.A., Trusov A.A. **2020.** [New data on the structure of submarine volcanoes of the Central and Southern Kuriles]. In: *IX International conference "Marine Research and Education» (MARESEDU-2020)*", 3(3): 482–485. (In Russ.).

6. Bondarenko V.I. **1986.** The structure of the Kraternaya volcanic depression, Kuril Islands: Seismoacoustic surveys. *Volcanology and Seismology*, 5: 96–101.

7. Bondarenko V.I. **1990.** Stroenie podvodnyh kal'der po dannym sejsmoakusticheskogo profilirovaniya (na primere Kuril'skoj ostrovnoj dugi) [The structure of submarine calderas according to the data of seismoacoustic profiling (by the example of the Kuril island arc)]: [Extended abstract of candidate's dissertation in Geology and Mineralogy]. Moscow, 24 p. (In Russ.).

8. Bondarenko V.I. **2015.** [Structure and forming history of the Ushishir volcanic massif (Central Kurile)]. In: *Geology of seas and oceans: Materials of the XIX International scientific conference (School) on marine geology*. Moscow: GEOS, vol. 5: 38–42. (In Russ.).

9. Bondarenko V.I., Nadezhnyi A.M. **1987.** Acoustic inhomogeneities of sedimentary cover in the area of submarine hydrothermal vent near Paramushir Island. *Volcanology and Seismology*, 2: 100–104.

10. Bondarenko V.I., Rashidov V.A. **2003.** On probable submarine volcanic activity in region Chernye Brat'ya islands (Kurile Islands). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 2: 80–88. (In Russ.).

11. Bondarenko V.I., Rashidov V.A. **2006.** A submarine volcanic zone to the West of Paramushir Island (Kuril island arc). *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 2(8): 69–85. (In Russ.).

12. Bondarenko V.I., Rashidov V.A. **2011.** [Appearance of gas hydrate and mud volcanism in area of Bussol' strait (Kurile island arc)]. In: *Geology of seas and oceans: Materials of the XIX International scientific conference (School) on marine geology, Moscow, November 14–18, 2011.* Moscow: GEOS, vol. 5: 38–42. (In Russ.).

13. Bondarenko V.I., Rashidov V.A. **2018a.** The structure of the Ushishir Volcanic Massif, Central Kurils. *J. of Volcanology and Seismology*, 12(1): 16–33. https://doi.org/10.1134/s0742046318010025

14. Bondarenko V.I., Rashidov V.A. **2018b.** [Underwater volcanic activity on the Okhotsk side of the Kuril island arc]. *Actual Problems of Oil and Gas*, 4(23). (In Russ.). https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art51

15. Bondarenko V.I., Rashidov V.A. **2019.** [Submarine Caldera of Prostor Bay, Iturup Island, Kurile islands]. In: *Geology of seas and oceans: Materials of the XXIII International scientific conference (School) on marine geology, Moscow, November 18–22, 2019.* Moscow: GEOS, vol. 5: 54–57. (In Russ.).

16. Gavrilenko G.M. **1987**. [Submarine volcanic and hydrothermal activity as a source of metals in Island-Arc ferromanganese deposits]. Vladivostok: Dalnauka, 165 p. (In Russ.).

17. Ginzburg G.D., Solovyov V.A. **1994.** [*Submarine gas hydrates*]. St. Petersburg: All-Russia Research Institute for Geology and Mineral Resources of the World Ocean "VNIIOkeangeologiya", 199 p. (In Russ.).

18. Zonenshain L.P., Murdmaa I.O., Baranov B.V., Kuznetsov A.P., Kuzin V.C., Kuz'min M.I., Avdeiko G.P., Stunzhas P.A., Lukashin V.N., Barash M.C., Valyashko G.M., Demin L.L. **1987.** [Underwater gas source in the Sea of Okhotsk to the west from Paramushir Island]. *Oceanology*, 27(5): 795–800. (In Russ.).

19. Kozlov D.N. **2015.** *Crater Lakes of the Kuril Islands.* Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin. obl. kraevedch. muzey; In-t morskoy geologii i geofiziki DVO RAN, 112 p. (In Russ.).

20. Lomtev V.L. **2014.**To the structure and cenozoic cover gas presence of the Northern Mid-Kuril trough (by seismic continuous data). *Deep Oil*, 2(6): 953–968. (In Russ.).

URL: http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-2-6-2014/6\_Lomtev\_2-6-2014.pdf

21. Lomtev V.L., Patrikeev V.N. **2012.** New peculiarities in the structure of Northern Mid-Kuril Trough (based on seimic continuous data). *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 2(20): 59–70. (In Russ.).

22. Mel'nichenko Yu.I., Kazanskiy B.A., Obzhirov A.I. **1990.** [Hydroacoustic effects during echo sounding of the floor of marine basins]. In: *Novye dannye po geomorfologii i geologii zapadnoy chasti Tikhogo okeana* [New data on geomorphology and geology of the Western Pacific]. Vladivostok: DVO AN SSSR, p. 75–89. (In Russ.).

23. Nadezhnyi A.M., Bondarenko V.I. **1989.** Gas gidrates in the Kamchatka-Paramushir part of the Sea of Okhotsk. *Doklady Earth Sciences*, 306(5): 1192–1195. (In Russ.).

24. Obzhirov A.I. Astakhova N.V., Lipkina M.I., Vereshchagina O.F., Mishukova G.I., Sorochinskaya A.V., Yugay I.G. **1999.** [*Gasgeochemical zoning and floor mineral association of the Sea of Okhotsk*]. Vladivostok: Dalnauka, 183 p. (In Russ.).

25. Podvodnyy vulkanizm i zonal'nost' Kuril'skoy ostrovnoy dugi [Submarine volcanism and zonation of the Kuril island arc] (Ed. Yu.M. Pushcharovskiy). **1992.** Moscow: Nauka, 528 p. (In Russ.).

26. Rashidov V.A. **2010.** Geomagnitnye issledovaniya pri izuchenii podvodnyh vulkanov ostrovnyh dug i okrainnyh morej zapadnoj chasti Tihogo okeana [Geomagnetic investigations during the study of submarine volcanoes at island arcs and in marginal seas of the Western Pacific]: [Extended abstract of candidate's dissertation in Engineering]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 27 p. (In Russ.).

27. Rashidov V.A. **2013**. Taketomi subordinate volcano, Atlasov Island, the Kurile island arc. *Geophysical Processes and Biosphere*, 12(1): 5–13. (In Russ.).

28. Rashidov V.A., Bondarenko V.I. **2004.** Geophysical studies of Krylatka submarine volcano, Kuril Islands. *Journal of Volcanology and Seismology*, 4: 65–76.

29. Gaedicke C., Baranov B.V., Obzhirov A.I. Lelikov E.P., Belykh I.N., Basov E.I. **1997**. Seismic stratigraphy, BSR distribution and venting of metan-rich fluids west off Paramushir and Onekotan Islands, northern Kurils. *Marine Geology*, 136: 259–276. https://doi.org/10.1016/s0025-3227(96)00067-9

30. Tanakadate H. **1934.** Volcanic activity in Japan during the period between June 1931 and June 1934. *Japanese J. of Astronomy and Geophysics*, 12: 89–108.

#### Об авторах

БОНДАРЕНКО Вячеслав Илларионович (ORCID 0000-0002-6521-2915), кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры биологии и экологии, Костромской государственный университет, Кострома, vibond@list.ru РАШИДОВ Владимир Александрович (https://orcid. org/0000-0002-5790-6829), кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры петрологии и геохимии, Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, rashidva@kscnet.ru

#### **About the Authors**

BONDARENKO Vyacheslav I. (https://orcid.org/0000-0002-6521-2915), Cand. of Sciences (Geol. and Miner.), Associate Professor at the Department of biology and ecology, Kostroma State University, Kostroma, vibond@list.ru RASHIDOV Vladimir A. (https://orcid.org/0000-0002-5790-6829), Cand. of Engineering, Senior Researcher at the Laboratory of petrology and geochemistry, Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, rashidva@kscnet.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 551.21+519.23(571.645)

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.014-026

# Статистический анализ распределения продуктов фреатического извержения в кальдере вулкана Головнина (о. Кунашир, Курильские острова)

© 2021 А. И. Казаков\*, О. В. Веселов, Д. Н. Козлов

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия \*E-mail: legn@inbox.ru

Резюме. Представлены результаты обработки статистическими методами данных о мощности и размерности фрагментов тефры андезитодацитового состава, изверженных в результате фреатического взрыва в кальдере вулкана Головнина около 1 тыс. л.н. Дано петрохимическое описание продуктов вулканической деятельности корового вулкана Головнина и его эволюции, основанное на геологогеофизических данных. Взаимосвязь между мощностью тефры, размерами ее фрагментов и расстоянием до центра извержения исследована с применением полиномиальных регрессий разной степени и экспоненциального распределения. Адекватность построенных моделей исходным данным проиллюстрирована коэффициентами детерминации. Построены модели распределения тефры на основе трехмерного тренд-анализа. Впервые применена логарифмическая модель для описания распределения размера обломков тефры, оценена ее точность. Получен способ оценки потенциальной дальности разброса фрагментов тефры определенного размера. Продемонстрированы возможности математической статистики при описании распространения продуктов вулканических извержений определенного типа. Результаты исследования могут пригодиться при создании информационной базы о распространении пирокластитов Курило-Камчатской вулканической области.

Ключевые слова: кальдера Головнина, тефра, тренд-анализ, логарифмическая модель

#### Statistical analysis of the distribution of phreatic eruption products in the caldera of the Golovnin volcano (Kunashir Island, Kuril Islands)

Artem I. Kazakov\*, Oleg V. Veselov, Dmitry N. Kozlov

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia \*E-mail: legn@inbox.ru

**Abstract.** The paper presents the results of statistical processing of data on the thickness and size of the tephra fragments of andesidacite composition erupted as a result of a phreatic explosion in the caldera of Golovnin volcano about 1000 years ago. A petrochemical description of the products of volcanic activity of the crustal Golovnin volcano and its evolution process is presented based on geological and geophysical data. The relationship between the thickness of the tephra, the size of its fragments, and the distance to the eruption center was studied using the polynomial regressions of varying degrees and exponential distribution. The adequacy of the constructed models to the initial data is illustrated by determination coefficients. Tephra distribution models were constructed on the basis of a three-dimensional trend analysis. For the first time, a logarithmic model was used to describe the size of tephra fragments. The accuracy of the model used was estimated. A method for estimating the potential dispersion range of tephra fragments of a certain size was obtained. The work demonstrates the potential of mathematical statistics for describing the distribution of products of volcanic eruptions of a certain type. The results of this study are suitable for creating an information database of pyroclastite distribution across the Kuril-Kamchatka volcanic region.

Keywords: Golovnin caldera, tephra, trend analysis, logarithmic model

Для цитирования: Казаков А.И., Веселов О.В., Козлов Д.Н. Статистический анализ распределения продуктов фреатического извержения в кальдере вулкана Головнина (о. Кунашир, Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 2021, 5(1), с 14–26. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.014-026

#### Благодарности

Авторы выражают благодарность Александру Борисовичу Белоусову за плодотворное руководство экспедиционной работой и интерпретацией материалов на начальных этапах исследования в 2005–2006 гг.

#### Введение

На островах Курильской островной дуги (КОД) насчитывают 31 вулкан, извергавшийся в историческое время, и 12 вулканов, проявляющих сольфатарную деятельность [Сергеев, 1976; Федорченко и др., 1989; Рыбин и др., 2017]. Трудно предсказуемые во времени проявления вулканической активности, площади покрытия пеплопадом, объемы изверженного материала и другие сопутствующие извержениям эффекты представляют постоянную потенциальную опасность для жизнедеятельности на Курильских островах, а также для воздушного и водного транспорта Дальневосточного региона. Изучение результатов извержений активных вулканов, включая определение площади разброса пирокластики и мощности ее отложений, является актуальной задачей вулканологии.

На о. Кунашир, одной из наиболее населенных территорий Курильских островов, расположены три действующих вулкана – Головнина, Менделеева, Тятя и один потенциально активный – Руруй [Федорченко и др., 1989]. Оценка площадей покрытия продуктами последних извержений вулканов Тятя и Головнина была проведена в 2005–2006 гг. [Козлов, Белоусов, 2007; Козлов и др., 2008; Белоусов и др., 2017; Когор, Веlousov, 2006; Веlousov et al., 2017]. На каждом из этих вулканов в десятках пунктов с географической привязкой были измерены толщина слоя отложений и максимальный размер образцов обломочного материала извержений.

В работе [Козлов, Белоусов, 2007] проанализированы данные о мощности отложений тефры, размерах образцов последнего сильного эксплозивного извержения в кальдере влк. Головнина, произошедшего, согласно разным оценкам, от 1000 л.н. [Разжигаева, Ганзей, 2006] до 680–710 л.н. [Фазлуллин, Батоян, 1989] у южного подножья Центрально-Восточного купола (рис. 1). В результате были постро*For citation:* Kazakov A.I., Veselov O.V., Kozlov D.N. Statistical analysis of the distribution of phreatic eruption products in the caldera of the Golovnin volcano (Kunashir Island, Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, 5(1), pp. 14–26. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.014-026

#### Acknowledgements

Authors are grateful to Alexander Belousov for the fruitful leadership of the expeditionary work and the materials interpretation at the initial stages of the study in 2005–2006.

ены осредненные схемы с изолиниями мощности слоя тефры (изопахиты) и максимальных размеров пирокластических фрагментов (изоплеты) в зависимости от расстояния до центра эксплозии, сделаны выводы о районировании вулканической опасности, обусловленной проявлением подобного события.



Рис. 1. Схема отложений фреатического гидротермального извержения влк. Головнина и изопахиты (см) – линии равной толщины слоя отложений извержения, по [Козлов, Белоусов, 2007]: в числителе номер измерительного пункта, в знаменателе – максимальная толщина слоя тефры. Пунктир обозначает сомму вулкана. Геоморфологические особенности кальдеры: I – купол Центрально-Восточный, II – купол Центрально-Западный, III - купол Подушечный, IV - купол Крутой, V - гора Головнина, VI - озеро Кипящее, VII - озеро Горячее. На врезке – положение вулкана на о. Кунашир. Figure 1. Scheme of the sediments of the Golovnin volcano phreatic hydrothermal eruption and isopachs (cm) - lines of the eruption sediment layer of equal thickness according to [Kozlov, Belousov, 2007]: the numerator is the number of the measuring point, the denominator is the maximum thickness of the tephra layer. The dotted line indicates the somma. Geomorphological features of the caldera: I - Central-Eastern dome, II - Central-Western dome, III - Podushechny dome, IV - Krutoy dome, V - Golovnin mountain, VI - Kipyashchee lake, VII - Goryachee lake. The inset shows the position of the Volcano on Kunashir Island.

Авторы настоящей работы, один из которых участвовал в отборе продуктов последнего сильного извержения влк. Головнина, считают, что применение методов математической статистики [Дэвис, 1990; Геворкян и др., 2016] позволяет на основе имеющихся выборок из генеральной совокупности данных по тефре вулкана получить статистические модели, наиболее точно соответствующие закономерностям распределения тефры в изучаемом объеме. Статистическая обработка данных о распределении продуктов фреатического извержения влк. Головнина позволила построить двух- и трехмерные модели мощности слоя тефры, размеров ее фрагментов, при этом были рассмотрены варианты тренда изменения характеристик тефры в зависимости от расстояния до центра извержения.

По петрохимическому составу тефра последнего сильного извержения влк. Головнина является андезитодацитовой и риолитовой [Мархинин, 1959; Фазлуллин, Батоян, 1989], что свидетельствует о высоковязком составе верхнего магматического очага, обусловившем взрывной характер извержения, поэтому авторы посчитали необходимым представить краткое геолого-геофизическое описание строения влк. Головнина и эволюции его магматической деятельности, определившей состав продуктов последнего сильного извержения.

#### Описание вулкана Головнина по геолого-геофизическим данным

Кальдерный вулкан Головнина расположен на юге о. Кунашир (рис. 1). Его координаты 43°51′ N, 145°30′ Е. Диаметр кальдеры по гребню соммы равен примерно 4.5 км, диаметр древнего основания более 10 км [Мархинин, 1959; Козлов, 2015]. Наивысшей точкой соммы является гора Головнина высотой 547 м, находящаяся в юго-восточной части кальдеры (рис. 1). В центре кальдеры в широтном направлении расположены два экструзивных купола андезитодацитового состава – Центрально-Восточный и Центрально-Западный. На северо-западе кальдеры и ее юго-востоке находятся купола Подушечный и Крутой аналогичной морфологии и петрохимии. В центре кальдеры активно проявляется сольфатарная и гидротермальная деятельность. Температура сольфатар достигает 100 °С [Мархинин, 1959; Жарков, 2014].

История формирования влк. Головнина, возникшего как подводный вулкан, делится, по мнению отечественных вулканологов [Мархинин, 1959; Федорченко, 1962; Брайцева и др., 1994; и др.], на три основных периода. Первый – образование в позднем плейстоцене вулканического конуса высотой до 1500 м с центральным кратером на вершине. Второй – возникновение, в результате сильнейшего взрыва, кальдеры с обрушением центральной части вулканической постройки. Это событие, по данным С-датировок, произошло около 38 тыс. л.н. [Брайцева и др., 1994; Мелекесцев, 2005]. В третьем периоде в кальдере активно проявляется экструзивно-эксплозивная и фумарольно-сольфатарная деятельность. Деятельность влк. Головнина на протяжении всего существования была, по мнению Г.С. Горшкова, преимущественно эксплозивной, поэтому его отложения характеризуются очень большим количеством пирокластического материала [Горшков, 1967]. На первых этапах третьего периода в кальдере возникли ранее упомянутые купола, выжатые по субвертикальным зонам разломов из магматических очагов, находящихся в земной коре. Другими характерными морфологическими элементами кальдеры Головнина стали воронкообразные образования, которые определяются как воронки взрыва, возникшие позже формирования Центральных куполов [Федорченко, 1962]. Одним из наиболее выразительных примеров таких образований является воронка фреатического взрыва, частично врезанная в южное подножье Центрально-Восточного купола. Ее диаметр около 350 м, объем 0.00245 км<sup>3</sup> [Kozlov, Belousov, 2006]. Дно воронки занимает оз. Кипящее, диаметр которого более 200 м [Жарков, 2014; Козлов, 2015]. Глубина озера достигает 16 м, площадь его зеркала – 66 000 м<sup>2</sup> [Козлов, Жарков, 2010; Козлов, 2015]. Со дна озера поднимаются газовые струи с температурой до 90° [Жарков, 2014]. Эта воронка образовалась в результате последнего сильного проявления эксплозивной деятельности в кальдере, произошедшего, согласно разным оценкам, от 1000 л.н. [Разжигаева, Ганзей, 2006] до 680-710 л.н. [Фазлуллин, Батоян, 1989].

По результатам исследований были построены схемы изменения мощности отложений этого события в зависимости от расстояния до берега оз. Кипящее и изменения максимального размера обломков в зависимости от мощности отложений и удаления от озера [Козлов, Белоусов, 2007]. При взрыве объем выброшенного в юго-восточном направлении материала составлял 0.00241 км<sup>3</sup>, что практически совпадает с объемом озерной воронки. Мощность отложений изменяется от 2.5 м по берегам оз. Кипящее до 50-60 см на удалении 0.5 км. Средний размер обломков равен 8-12 см на расстоянии 1 км от озерного берега и 3-5 см - на расстоянии 2 км в юго-юго-западном направлении. Разбросанные по берегу озера крупные блоки достигают размеров 1.5 м [Жарков, 2014]. Отдельные образцы найдены на расстоянии до 10 км (образец 91Р андезитового состава обнаружен на 15-м километре дороги Менделеево-Головнино) [Федорченко и др., 1989].

#### Петрохимический состав вулканогенных отложений вулкана Головнина

Описание петрохимического состава вулканогенных отложений влк. Головнина необходимо для представления об эволюции продуктов извержений. По литературным данным известно 40 определений полного силикатного анализа изверженных пород этого вулкана [Мархинин, 1959; Петрохимия..., 1966; Фролова и др., 1985; Федорченко и др., 1989; Подводный..., 1992; Мартынов А., Мартынов Ю., 2017]. На основании петрохимических характеристик эффузивных пород нами построены классификационные диаграммы (рис. 2). Аналитические данные определений основных окислов удовлетворяют современным требованиям к геохимии этих окислов<sup>1</sup>. Исследованные образцы пород вулкана имеют в подавляющем большинстве (75 %) андезитовый и андезитодацитовый составы.

На классификационной диаграмме SiO<sub>2</sub> – (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) [Le Bas et al., 1986], дополненной схемой щелочной сериальности, породы вулкана находятся в поле низкой щелочности со-

гласно нормам терминологической Петрологической комиссии РАН<sup>2</sup>. Продукты извержений влк. Головнина на протяжении всех периодов его развития оставались низкокалиевыми со средним содержанием К<sub>2</sub>О (0.45 масс.%). Согласно критерию А. Мияширо [Miyashiro, 1974], породы ранних извержений вулкана на диаграмме SiO - FeO\*/MgO находятся в поле толеитов, но основная масса эффузивов (более 60 %) – в известково-щелочном поле. Тренд дифференциации эффузивов вулкана не прямолинеен. Он переходит из толеитового поля в известково-щелочное через область среднего состава, что свидетельствует о смене во времени термобарических условий магматических очагов [Рыбин, Пискунов, 1991].

На диаграммах отчетливо прослеживается эволюция магматической деятельности вулкана, при которой состав продуктов меняется от основного на первых этапах активности к более кислому на завершающих этапах. Таким образом, при эволюции эффузивной деятельности влк. Головнина от ранних извержений к более поздним происходила дифференциация состава магматического очага, при которой температура кристаллизации расплавов изменяется от высокой к более низкой при уменьшении глубины магматической камеры. Это свидетельствует о гомодромном характере эволюции вулканизма.

Для оценки температур и глубины основного магматического источника эффузивов влк. Головнина использованы представленные в работах [Печерский и др., 1975; Рассказов и др., 2007; Falloon et al., 2001; Lee, Chin, 2014; и др.] уравнения зависимости температуры и давления от содержания MgO и щелочных окислов. Согласно нашим расчетам по этим уравнениям, магматическая колонна находится в интервале глубин 40-26 км с температурами 1230-1100 °C, температурным градиентом около 9 °С/км. Основная магматическая камера, продуцирующая эффузивы, находится в интервале 35-31 км с температурами 1160-1135 °С.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. 2009. Изд. 3-е, испр. и доп. СПб.: ВСЕГЕИ, 198 с.

Petrograficheskiy kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya [The petrographic code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, and impact rocks]. 2009. Ed. 3. [revised and expanded]. SPb.: VSEGEI, 198 p. (In Russ.).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> *Knaccudpukaqua mazmamu*eckux (изверженных) пород и словарь терминов: Рекомендации Подкомиссии по систематике изверженных пород Международного союза геологических наук. **1997**. М.: Недра, 248 с. (Пер. с англ.) *A classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the systematics of igneous rocks.* Ed. by R.W. Le Maitre. **1989**. Oxford: Blackwell Science Inc. URL: https://www. amazon.com/Classification-Igneous-Rocks-Glossary-Terms/dp/063202593X (accessed 24.11.2020).

Исходя из анализа диаграмм Харкера (рис. 2 б, г, ж, з), низкие концентрации TiO<sub>2</sub>, CaO, FeO\*, K<sub>2</sub>O доказывают принадлежность эффузивов влк. Головнина к умеренно-щелочной серии островодужного геохимического типа. Широкий диапазон состава изверженных пород вулкана (от базальтов до риодацитов) свидетельствует о длительной эволюции магматических очагов, присущей коровым вулканам, которые характеризуются серией промежуточных коровых очагов по определению В.Л. Сывороткина [1996]. Эволюция состава магмы, поступающей к поверхности, от островодужных толеитов к известково-щелочным



**Рис. 2.** Классификационные диаграммы изверженных пород влк. Головнина (о. Кунашир) (содержание в масс.%): (a) TAS-диаграмма: SiO<sub>2</sub> – (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) [Le Bas et al., 1986] и схема сериальности щелочей, ряды щелочности: I – низкой, II – нормальной, III – умеренной; (б) SiO<sub>2</sub> – K<sub>2</sub>O, породы: HK – низкокалиевые, VK – умереннокалиевые; (в) SiO<sub>2</sub> – FeO\*/MgO (согласно критерию [Miyashiro, 1974]); (г) SiO<sub>2</sub> – FeO\*; (д) SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (е) SiO<sub>2</sub> – MgO; (ж) SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (з) SiO<sub>2</sub> – TiO<sub>2</sub>. Символами обозначены породы влк. Головнина по соотношению FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: кружками – больше 1 (восстановительные условия формирования магмы), крестиками – меньше 1 (окислительные условия формирования магмы).

**Figure 2.** Classification diagrams of igneous rocks of the Golovnin volcano (Kunashir Island) (content in wt%): (a) TAS-diagram: SiO<sub>2</sub> – (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) [Le Bas et al., 1986] and the scheme of alkali seriality, series of alkalinity: I – low, II – normal, III – moderate; (6) SiO<sub>2</sub> – K<sub>2</sub>O diagram, rocks: HK – low potassium, VK – moderate potassium; (B) SiO<sub>2</sub>-FeO\*/MgO diagram according to A. Miyashiro's criterion [Miyashiro, 1974]; (r) SiO<sub>2</sub> – FeO\* diagram; ( $\alpha$ ) SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diagram; (e) SiO<sub>2</sub> – MgO diagram; ( $\alpha$ ) SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diagram; (3) SiO<sub>2</sub> – TiO<sub>2</sub> diagram. Legend of the rocks of the Golovnin volcano on the basis of FeO / Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio: circles – more than 1 (reducing conditions of magma formation), crosses – less than 1 (oxidizing conditions of magma formation). породам соответствует, как отмечено выше, гомодромной направленности изменения во времени состава магматических продуктов [Геохимия..., 1984; Богатиков, Цветков, 1988; и др.]. Такая эволюция магм происходит из-за возрастающей доли внутрикорового магматизма. Формирование андезитодацитового и риолитового расплавов обусловлено приближением к поверхности коровых магматических очагов. Низкая титанистость продуктов заключительных извержений также является доказательством малоглубинности магматического очага [Фролова и др., 1989].

О близости к поверхности магматических камер свидетельствует высокий фоновый тепловой поток (ТП) о. Кунашир [Веселов, Соинов, 1997]. На склонах активных вулканов южной части Курильской островной дуги ТП резко возрастает. Так, на северо-восточном склоне влк. Менделеева, кальдера которого возникла почти одновременно с образованием кальдеры влк. Головнина [Брайцева и др., 1994], ТП изменяется от 400 до 900 мВт/м<sup>2</sup> и выше. Этот высокий ТП создается близко расположенными к поверхности магматическими очагами среднего и кислого составов. Под Нижне-Менделеевским участком кровля магматического очага дацитового состава находится на глубинах 3-5 км с температурой в центре очага 750-780 °С [Веселов, Соинов, 1997; Ильев и др., 2009].

Аналогичная геотермическая ситуация присуща влк. Головнина, кальдера которого характеризуется активными сольфатарными и гидротермальными проявлениями. По сейсмическим данным, полученным Т.К. Злобиным методом обменных волн землетрясений, под влк. Головнина выделяются как глубинная зона затухания сейсмических волн в интервале 20-40 км, так и приповерхностная зона отсутствия обменов сейсмических волн в интервале 5-10 км [Злобин, Федорченко, 1982; Злобин, 1987]. В районе оз. Кипящее устанавливается подъем области отсутствия обменов сейсмических волн до глубины 3 км [Злобин, 1987]. При медленном продвижении магмы к земной поверхности состав титаномагнетитов в габброидах будет соответствовать последнему равновесному состоянию температуры и давления кислорода в расплаве до начала его кристаллизации [Печерский и др., 1975]. Как свидетельствуют результаты исследований [Печерский и др., 1975; Ермаков,

Печерский, 1989], включения габброидов, прошедшие высокотемпературную переработку в среде пород земной коры на глубинах 5-20 км в высокоокислительных условиях с участием мантийных флюидов, становятся вторично магнитными и отношение TiO<sub>2</sub>/FeO в этих породах находится в пределах 0.02-0.06. Четверть образцов из 40 определений полного силикатного состава, использованных нами по литературным данным для построения классификационных диаграмм (рис. 2), характеризуется этими показателями, что свидетельствует о существовании магматических очагов под влк. Головнина в пределах верхней части земной коры. Периферический очаг под оз. Кипящее является источником продуктов последнего сильного извержения андезитодацитового и риолитового состава. Аналогичное по петрохимическому составу эффузивов извержение, по нашему мнению, вероятно для влк. Менделеева. В связи с этим статистические методы анализа распространения тефры влк. Головнина могут служить для характеристики продуктов подобных извержений других действующих вулканов КОД, таких как вулканы Менделеева, Заварицкого и др.

В данной работе изучены статистическими методами [Дэвис, 1990; Геворкян и др., 2016] особенности выпадения продуктов последнего сильного эксплозивного извержения в кальдере влк. Головнина.

# Методы и результаты исследования изверженного материала

Для создания карты распространения продуктов взрывного извержения в кальдере влк. Головнина Д.Н. Козловым и А.Б. Белоусовым в 2006 г. были проведены измерения мощности слоя тефры в 28 пунктах и максимальных размеров пирокластических фрагментов тефры в 22 пунктах. Систематизация данных, их обработка позволили составить карты изопахит и изоплет продуктов взрыва (рис. 3) [Kozlov, Belousov, 2006]. Данные о мощности слоя и размере обломков приведены в таблице.

При оценке взаимосвязи между мощностью слоя тефры и максимальными размерами ее фрагментов на основе результатов [Козлов, Белоусов, 2007] нами были применены линейная и полиномиальные модели регрессии 2–6 степеней, а также экспоненциальная кривая. С помощью полученной зависимости проведена аппроксимация мощности слоя тефры в пунктах, где была измерена только величина ее фрагментов, а также обратная аппроксимация.

Для построения моделей разброса тефры применялся трехмерный тренд-анализ, в качестве аналитически заданной поверхности предложена логарифмическая функция. На основе этой трехмерной модели получен способ оценки потенциальной дальности перемещения фрагментов тефры определенного размера.

В целях зонирования продуктов извержения изопахиты и изоплеты заданы уравнениями в полярных координатах.

Для выявления зависимости между мощностью слоя тефры и максимальным размером ее фрагментов построены двухмерные модели регрессии методом наименьших квадратов по тем пунктам, в которых измерены обе величины. Таким образом получен линейный тренд m = 4.438d + 3.051, где m и d – мощность слоя и размер фрагментов тефры в сантиметрах соответственно (рис. 4). Коэффициент детерминации составил 89 %. Этот показатель позволяет использовать полученный линейный тренд для аппроксимации мощности слоя тефры в пунктах, где была измерена только величина ее фрагментов, а также для обратной аппроксимации.

Помимо линейной регрессии для описания связи между мощностью слоя и размером фрагментов тефры нами были применены уравнения полиномиальной регрессии степеней от 2 до 6, а также экспоненциальная функция. Коэффициент детерминации для полиномиальных кривых составил 89–93 %, а для экспоненты – 80 %. Различие в точности приближения не более 4 % между линейной

Таблица. Данные о мощности слоя *m* и величине фрагментов *d* продуктов фреатического извержения влк. Головнина

Table. Data on the thickness of the layer m and the size of fragments d for products of the Golovnin volcano phreatic eruption

Параметр	Номер точки отбора														
парамстр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
т, см	50	200	70	210	28	40	35	20	_	17	5	7	5	5	40
<i>d</i> , см	10.3	—	6.4	_	4	8.8	6	7.4	1.5	3.5	0.5	0.7	0.7	0.7	7.5
	Номер точки отбора														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
<i>m</i> , см	15	10	2	3	0	0	1	1	3	5	7	13	30	40	
<i>d</i> , см	3.4	1	0.5	-	_	_	-	_	0.5	0.5	1.6	1	6	6.6	

Примечание. Прочерк – отсутствие данных.

Note. Dash – no data available.



**Рис. 3.** Карта распространения продуктов фреатического извержения влк. Головнина: (а) линии равной толщины слоя отложений – изопахиты (см); (б) линии равного размера тефры – изоплеты (см) [Козлов, Белоусов, 2007]. **Figure 3.** Products distribution map of the Golovnin volcano phreatic eruption: (a) lines of the sediment layer of equal thickness – isopachs (cm); (б) lines of tephra of equal size – isopleths (cm) [Kozlov, Belousov, 2007].



**Рис. 4.** Линейная регрессия мощности слоя тефры фреатического извержения влк. Головнина на размер ее фрагментов.

**Figure 4.** Linear regression of the tephra layer thickness of the Golovnin volcano phreatic eruption on the size of its fragments.

моделью и нелинейными представляется нам незначительным по сравнению с возрастающей сложностью вычислений. Кроме того, мощность слоя тефры и величина ее фрагментов выражены в одних и тех же единицах измерения и формирование мощности слоя происходит путем сложения величин фрагментов тефры или их частей. Таким образом, как физически, так и математически для выявления закономерности между величиной фрагментов тефры фреатического извержения влк. Головнина и мощностью ее слоя оптимальной является линейная регрессионная модель.

Для построения моделей разброса тефры применялся трехмерный тренд-анализ. Логарифмическая модель для описания распределения мощности слоя тефры приняла следующий вид:  $\overline{m} = 48.838 - 52.327 ln \sqrt{x^2 + y^2}$  (рис. 5).

Для статистической оценки построенной трехмерной модели распространения изверженных продуктов применен дисперсионный анализ, коэффициент множественной корреляции составил 80 %.

Получены также упрощенные двухмерные аналитические модели разброса тефры. С этой целью эллиптические изопахиты и изоплеты, построенные в работе [Козлов, Белоусов, 2007] (рис. 3), аппроксимированы уравнениями в полярных координатах. В частности, для изопахит имеем следующие зависимости ( $\rho$  – полярный радиус,  $\varphi$  – полярный угол):



Рис. 5. Логарифмическая модель мощности слоя тефры фреатического извержения влк. Головнина. Горизонтальные оси – широтное и меридиональное направления в пространстве (км), вертикальная – мощность отложений фреатического извержения (см). Начало отсчета в координатах (х; у) приурочено к центру оз. Кипящее. Figure 5. Logarithmic model of the tephra layer thickness of the Colourin valuence phrastice eruption.

of the Golovnin volcano phreatic eruption. Horizontal axes – latitudinal and meridional directions in space (km), vertical axis – thickness of phreatic eruption sediments (cm). The reference point in the coordinates (x; y) is confined to the center of the Kipyashchee lake.

200 см: 
$$\rho = \frac{0.01}{1 - 0.759 \cos \varphi}$$
 (43°52'15" N, 145°31'02" E),

50 см: 
$$\rho = \frac{0.04}{1 - 0.507 \cos \varphi}$$
 (43°51'57" N, 145°30'32" E),

40 см: 
$$\rho = \frac{0.07}{1 - 0.554 \cos \varphi}$$
 (43°51'57" N, 145°30'32" E),

15 cm: 
$$\rho = \frac{0.11}{1 - 0.524 \cos \varphi}$$
 (43°52'00" N, 145°30'10" E),

5 cm: 
$$\rho = \frac{0.15}{1 - 0.549 \cos \varphi}$$
 (43°51'57" N, 145°30'01" E).

Для построения каждого из пяти уравнений за полюс принят фокус изопахиты, находящийся ближе к оз. Кипящее (его координаты для каждой зависимости указаны в скобках), за полярную ось – направление максимального разноса обломочного материала (азимут 225°).

При статистическом анализе были также рассмотрены варианты поверхности тренда для размера фрагментов тефры (плоскости, поверхности второго порядка и др.). Среди них наиболее качественным приближением (коэффициент множественной корреляции



**Рис. 6.** Логарифмическая модель для размера фрагментов тефры фреатического извержения влк. Головнина. Горизонтальные оси – широтное и меридиональное направления в пространстве, вертикальная – размер фрагментов тефры.

**Figure 6.** Logarithmic model for the size of tephra fragments of the Golovnin volcano phreatic eruption. Horizontal axes – latitudinal and meridional directions in space, vertical axis – the size of tephra fragments.

72 %) является также логарифмический тренд:  $\overline{d} = 3.104 - 1.618 ln \sqrt{x^2 + y^2}$  (рис. 6). С помощью этой модели можно оценить потенциальную дальность перемещения *r* в результате извержения фрагмента тефры в зависимости от его размера *d*. Каждому размеру *d* соответствует окружность разброса с радиусом *exp* (3.8368 – 1.2361*d*).

В результате проведенных нами исследований вычислен коэффициент корреляции между мощностью слоя тефры последнего сильного извержения влк. Головнина и величиной ее обломков, составивший 95 %. Это позволило построить модели распределения по площади продуктов извержения с хорошей точностью (коэффициент детерминации 70–90 %).

Методы математической статистики, примененные в настоящей работе для анализа распределения мощности слоя тефры, построения зависимостей между мощностью слоя тефры и максимальным размером ее фрагментов, могут быть использованы при исследовании других коровых вулканов.

#### Выводы

Мощность слоя тефры последнего сильного извержения влк. Головнина имеет тесную линейную связь с размером фрагментов тефры этого извержения (коэффициент корреляции составил 95 %). Исследование показало, что по сравнению с экспоненциальной и полиномиальными моделями степеней от 2 до 6 оптимальной для выявления закономерности между величиной фрагментов тефры фреатического извержения влк. Головнина и мощностью ее слоя является линейная регрессионная модель. Из различных вариантов поверхностей тренда для размера фрагментов тефры наиболее качественным приближением является логарифмический тренд (коэффициент множественной корреляции 72 %).

Проведенный статистический анализ распределения андезитодацитовой тефры фреатического извержения в кальдере влк. Головнина позволил построить математические модели хорошей точности (70–93 % соответствия исходным данным). Использованные в настоящем исследовании статистические методы впервые применены к анализу продуктов извержения влк. Головнина. Эти результаты, как показано на примере расчета дальности разброса обломков в зависимости от их размера, несомненно полезны при оценке вулканоопасности района.

Продемонстрированные в работе возможности математической статистики в области описания распространения продуктов извержений могут быть использованы при формировании сводной информационной базы характеристиках известных извержений 0 коровых вулканов, разумеется, в тех случаях, когда предлагаемые подходы применимы. Согласно полученным результатам, для извержений фреатического типа модели линейной регрессии адекватно описывают взаимосвязь между мощностью слоя тефры и размером ее обломков. При построении моделей с привязкой к пространственному фактору важную роль играет интенсивность извержения, объем выброшенных продуктов.

Оценки статистическими методами распространения продуктов извержения активного вулкана демонстрируют их применимость для анализа особенностей распространения пирокластитов активных вулканов Курильской островной дуги.

#### Список литературы

1. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Козлов Д.Н. **2017.** Распространение отложений тефры и реконструкция параметров эксплозивного извержения вулкана Тятя 1973 г., о. Кунашир, Курильские острова. *Вулканология и сейсмология*, 4: 48–56. URI: http://repo.kscnet.ru/id/eprint/3270 (дата обращения: 16.02.2021).

2. Богатиков О.А., Цветков А.А. 1988. Магматическая эволюция островных дуг. М.: Наука, 248 с.

3. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д., Литаева С.И. **1994.** Возраст действующих вулканов Курило-Камчатского региона. *Вулканология и сейсмология*, 4–5: 5–32.

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

5. Геворкян П.С., Потёмкин А.В., Эйсымонт И.М. 2016. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Физматлит, 176 с.

6. Геохимия магматических пород океана и зон сочленения океан — континент (отв. ред. Л.В. Таусон). **1984.** Новосибирск: Наука, 185 с.

7. Горшков Г.С. 1967. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 287 с.

8. Дэвис Дж.С. **1990.** *Статистический анализ данных в геологии*: пер. с англ. Кн. 2. М.: Недра, 429 с. URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-0603397941a9dzhsdevisstatisticheskiyanalizdannyhvgeolo giikniga2-1.pdf (дата обращения: 12.01.2021).

9. Ермаков В.А., Печерский Д.М. **1989.** Природа включений габброидов из молодых лав Курильских островов. *Тихоокеанская геология*, 4: 45–55.

10. Жарков Р.В. 2014. Термальные источники Южных Курильских островов. Владивосток: Дальнаука, 378 с.

11. Злобин Т.К. **1987.** Строение земной коры и верхней мантии Курильской островной дуги (по сейсмическим данным). Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 150 с.

12. Злобин Т.К., Федорченко В.И. **1982.** Глубинная структура вулкана Головнина по данным изучения обменных волн от землетрясений. *Вулканология и сейсмология*, 4: 99–103.

13. Ильёв А.Я., Кононов В.Э., Веселов О.В., Красиков В.Н., Волгин П.Ф., Кочергин Е.В., Кочергин А.В., Сеначин В.Н., Шереметьева Г.Н., Лютая Л.М. **2009.** *Геолого-геофизическая характеристика и перспективы нефтегазоносности Срединно-Курильского прогиба*. Владивосток: Дальнаука, 141 с.

14. Козлов Д.Н. **2015.** *Кратерные озера Курильских островов.* Южно-Сахалинск: Сахалинский областной краеведческий музей; ИМГиГ ДВО РАН, 112 с.

15. Козлов Д.Н., Белоусов А.Б. **2007.** Характеристики отложений тефры последнего фреатического извержения в кальдере Головнина (Кунашир, Курильские острова) – ключ к оценке опасности будущих извержений. В кн.: Изучение природных катастроф на Сахалине и Курильских островах: сб. мат-лов I (XIX) Междунар. конф. молодых ученых, г. Южно-Сахалинск, 15–20 июня 2006 г. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 164–166.

16. Козлов Д.Н., Жарков Р.В. **2010.** Морфология и генезис озер кальдерных комплексов Головнина и Заварицкого (Курильские острова). *Вестник ДВО РАН*, 3: 103–106.

17. Козлов Д.Н., Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. **2008.** Распространение тефры извержения вулкана Тятя 1973 г. (о. Кунашир, Курильские острова). В кн.: *Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: вторая Сахалинская молодеж. научная школа, 4–10 июня 2007, Южно-Сахалинск:* сб. материалов. Южно-Сахалинск, 264–267.

18. Мартынов А.Ю., Мартынов Ю.А. **2017.** Плейстоценовый базальтовый вулканизм о. Кунашир (Курильская островная дуга): минералогия, геохимия, результаты компьютерного моделирования. *Пе-трология*, 25 (2): 194–214. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary\_28919451\_78315408.pdf (дата обращения: 12.01.2021).

19. Мархинин Е.К. **1959.** Вулканы острова Кунашир. В кн.: *Вулканизм Камчатки и Курильских островов.* М.: Изд-во АН СССР, 64–155.

20. Мелекесцев И.В. **2005.** Новейший (N<sub>2</sub><sup>2</sup> – Q<sub>4</sub>) наземный и подводный вулканизм Курильской островной дуги. В кн.: *Новейший и современный вулканизм на территории России* (отв. ред. Н.П. Лаверов). М.: Наука, 233–335.

21. Петрохимия кайнозойской Курило-Камчатской вулканической провинции (под ред. Э.Н. Эрлиха). **1966.** М.: Наука, 278 с.

22. Печерский Д.М., Багин В.И., Бродская С.Ю., Шаронова З.В. 1975. Магнетизм и условия образования изверженных горных пород. М.: Наука, 288 с.

23. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги (отв. ред. Ю.М. Пущаровский). 1992. М.: Наука, 527 с.

24. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А. **2006.** Обстановки осадконакопления островных территорий в плейстоцен-голоцене. Владивосток: Дальнаука, 247 с. 25. Рассказов С.В., Демонтёрова Е.И., Иванов А.В., Брандт И.С., Брандт С.В. **2007.** Эволюция позднекайнозойского магматизма на границе Тувино-Монгольского массива (Восточная Тува). Иркутск: ИЗК СО РАН, 161 с.

26. Рыбин А.В., Пискунов Б.Н. **1991.** О петрохимическом родстве составов интрузивных и эффузивных пород Курильских островов (на примере острова Кунашир). В кн.: *Геология, металлогения и гидрогеология Сахалина и Курильских островов*. Владивосток: ДВО РАН, 82–90.

27. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В., Гурьянов В.Б. **2017.** Вулканическая активность на Курильских островах в XXI в. *Вестник ДВО РАН*, 1: 51–61.

28. Сергеев К.Ф. 1976. Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука, 240 с.

29. Сывороткин В.Л. 1996. Коровые вулканы Курило-Камчатской островной дуги. М.: Геоинформмарк, 52 с.

30. Фазлуллин С.М., Батоян В.В. **1989.** Донные осадки кратерного озера вулкана Головнина. *Вулканология и сейсмология*, 2: 44–55.

31. Федорченко В.И. **1962.** Основные этапы посткальдерного периода формирования вулкана Головнина (о. Кунашир). В кн.: *Геология и геофизика*. Южно-Сахалинск, 127–142. (Труды СахКНИИ; вып. 12).

32. Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. 1989. Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 239 с.

33. Фролова Т.И., Бурикова И.А., Гущин А.В., Фролов В.Т., Сывороткин В.Л. **1985.** *Происхождение вулканических серий островных дуг.* М.: Недра, 275 с.

34. Фролова Т.И., Перчук Л.Л., Бурикова И.А. 1989. Магматизм и преобразование земной коры активных окраин. М.: Недра, 261 с.

35. Belousov A., Belousova M., Kozlov D. 2017. Strong hydrothermal eruption 600 BP inside Golovnin caldera, Kunashir Island, Kurile arc. In: 19th EGU General Assembly, EGU 2017: Proceedings from the conference held 23–28 April, 2017 in Vienna, Austria, p. 7596.

36. Falloon T.J., Danyushevsky L.V., Green D.H. **2001.** Peridotite melting at 1 GPa: Reversal experiments on partial melt compositions produced by peridotite-basalt sandwich experiments. *J. Petrology*, 42 (12): 2363–2390. https://doi.org/10.1093/petrology/42.12.2363

37. Kozlov D., Belousov A. **2006.** Hydrothermal eruption – the most probable scenario of volcanic disaster in the Golovnina Caldera, Kunashir Island, Southern Kuriles. In: 5th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kuril-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5) and International Volcanological Field School for Graduate Students Japan, 9–14 July 2006, Sapporo, Japan. Sapporo: Hokkaido Univ. Int., p. 140–141.

38. Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. **1986.** A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. of Petrology*, 27(3): 745–750. https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745

39. Lee C.-T.A., Chin E.J. **2014.** Calculating melting temperatures and pressures of peridotite protoliths: implication for the origin of cratonic mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 403: 273–286. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.06.048

40. Miyashiro A. **1974.** Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American J. of Science*, 274(4): 321–355. https://doi.org/10.2475/ajs.274.4.321

#### References

1. Belousov A.B., Belousova M.G., Kozlov D.N. **2017.** The distribution of tephra deposits and reconstructing the parameters of 1973 eruption on Tyatya volcano, Kunashir I., Kuril Islands. *J. of Volcanology and Seismology*, 11(4): 285–294. https://doi.org/10.1134/s0742046317040029

2. Bogatikov O.A., Tsvetkov A.A. **1988.** *Magmaticheskaya evolyutsiya ostrovnykh dug* [*Magmatic evolution of island arcs*]. Moscow: Nauka, 248 p. (In Russ.).

3. Braytseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Sulerzhitskiy L.D., Litaeva S.I. **1994.** [Age of active volcanoes in the Kuril-Kamchatka region]. *Vulkanologiya i seysmologiya = Volcanology and Seismology*, (4–5): 5–31.

4. Veselov O.V., Soinov V.V. **1997.** [Heat flow of the Sakhalin and the Kuril Islands]. In.: *Struktura i veshchestvennyy sostav osadochnogo chekhla severo-zapada Tikhogo okeana* [*Structure and material composition of sedimentary cover of the northwest Pacific*]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN, 153–176. (Geodinamika tektonosfery zony sochleneniya Tikhogo okeana s Evraziey = Geodynamics of tectonosphere of the Pacific-Eurasia conjunction zone; vol. 4). (In Russ.).

5. Gevorkyan P.S., Potemkin A.V., Eysymont I.M. **2016.** *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [*Probability theory and mathematical statistics*]. Moscow: Fizmatlit, 176 p. (In Russ.).

6. Geokhimiya magmaticheskikh porod okeana i zon sochleneniya okean-continent [Geochemistry of ocean igneous rocks and the ocean-continent transition zones]. Eds. M.I. Kuz'min, L.V. Tauson. **1984.** Novosibirsk: Nauka, 181 p. (In Russ.). URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-geohimiya-magmaticheskih-porod-okeana-i-zon-sochleneniya-okean-kontinent.pdf (accessed 12.01.2021).

7. 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 16.02.2021).

8. Davis J.C. 1986. Statistics and data analysis in geology. New York: John Willey and Sons, 656 p.

9. Ermakov V.A., Pecherskiy D.M. **1989.** [The origin of gabbroid inclusions from young lavas in the Kuril Islands]. *Tikhookeanskaya geologiya* = *Geology of the Pacific Ocean*, 4: 45–55. (In Russ.).

10. Zharkov R.V. 2014. Thermal springs of the South Kuril Islands. Vladivostok: Dal'nauka, 378 p. (In Russ.).

11. Zlobin T.K. **1987.** Stroenie zemnoy kory i verkhney mantii Kuril'skoy ostrovnoy dugi (po seysmicheskim dannym) [Structure of the Earth's crust and the upper mantle of the Kuril island arc (according to the seismological data)]. Vladivostok: DVNTs AN SSSR [Far East Branch of the USSR Academy of Sciences], 150 p. (In Russ.).

12. Zlobin T.K., Fedorchenko V.I. **1982.** [Deep structure of the Golovnin volcano according to the data of study of earthquake converted-waves]. *Volcanology and Seismology*, 4: 99–103. (In Russ.).

13. Il'ev A.Ya., Kononov V.E., Veselov O.V. et al. **2009.** Geologo-geofizicheskaya kharakteristika i perspektivy neftegazonosnosti Sredinno-Kuril'skogo progiba [Geological and geophysical characteristic and the perspectives of oil-gas bearing of the Middle Kurile Trough]. Vladivostok: Dal'nauka, 141 p. (In Russ.).

14. Kozlov D.N. **2015.** *Kraternye ozera Kuril'skikh ostrovov* [*Crater lakes of Kuril Islands*]. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalinskiy oblastnoy kraevedcheskiy muzey [Sakhalin Regional Museum]; IMGiG DVO RAN, 112 p. (In Russ.).

15. Kozlov D.N., Belousov A.B. **2007.** [Characteristics of tephra sedimentations of the last pseudovolcanic eruption in the Golovnin caldera (Kunashir, the Kuril Islands) – a key to assessment of future eruptions hazard]. In: *Izuchenie prirodnykh katastrof na Sakhaline i Kuril'skikh ostrovakh: sb. mat-lov I (XIX) Mezhdunar. konf. molodykh uchenykh, g. Yuzhno-Sakhalinsk, 15–20 iyunya 2006 g [Study of natural disasters on the Sakhalin and Kuril Islands: proceedings of the I (XIX) International conference of young scientists, Yuzhno-Sakhalinsk, June 15–20, 2006*]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN, 164–166. (In Russ.).

16. Kozlov D.N., Zharkov R.V. **2010.** Morphology and genesis of the lakes of Golovnin and Zavaritsky calderal complexes (Kuril Islands). *Vestnik of the Far East Branch of the RAS*, 3: 103–106. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17256284 (accessed 16.02.2021).

17. Kozlov D.N., Belousov A.B., Belousova M.G. **2008.** [Distribution of tephra of the Tyatya volcano eruption in 1973 (Kunashir Island, Kurila Islands)]. In: *Prirodnye katastrofy: izuchenie, monitoring, prognoz: vtoraya Sakhalinskaya molodezh. nauchnaya shkola, 4–10 iyunya 2007, Yuzhno-Sakhalinsk* [Natural disasters: study, monitoring, forecast: the 2<sup>nd</sup> Sakhalin youth scientific school, June 4–10, 2007, Yuzhno-Sakhalinsk]. Yuzhno-Sakhalinsk, 264–267. (In Russ.).

18. Martynov A.Y., Martynov Y.A. **2017.** Pleistocene basaltic volcanism of Kunashir Island (Kuril island arc): Mineralogy, geochemistry, and results of computer simulation. *Petrology*, 25(2): 206–225. https://doi.org/10.1134/s0869591117020035

19. Markhinin E.K. **1959.** [The volcanoes of Kunashir Island]. In: *Vulkanizm Kamchatki i Kuril'skikh ostrovov* [Volcanism of Kamchatka and Kuril Islands]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 64–155. (In Russ.).

20. Melekestsev I.V. **2005.** [Recent  $(N_2^2 - Q_4)$  surface and underwater volcanism of the Kuril island arc]. In: *Noveyshiy i sovremennyy vulkanizm na territorii Rossii* [*Recent and modern volcanism in Russia*] (ed. N.P. Laverov). Moscow: Nauka, 233–335. (In Russ.).

21. Petrokhimiya kaynozoyskoy Kurilo-Kamchatskoy vulkanicheskoy provintsii [The petrochemistry of the Cenozoic Kuril-Kamchatka volcanic province] (ed. E.N. Erlikh). **1966.** Moscow: Nauka, 278 p. (In Russ.).

22. Pecherskiy D.M., Bagin V.I., Brodskaya S.Yu., Sharonova Z.V. **1975.** *Magnetizm i usloviya obrazovaniya izverzhennykh gornykh porod* [*Magnetism and formation conditions of igneous rocks*]. Moscow: Nauka, 288 p. (In Russ.).

23. Podvodnyy vulkanizm i zonal'nost' Kuril'skoy ostrovnoy dugi [Underwater volcanism and zonality of the Kuril island arc] (ed. Yu.M. Pushcharovskiy). **1992.** Moscow: Nauka, 527 p. (In Russ.). URL: http://www.kscnet.ru/ivs/bibl/sotrudn/avdeiko/mon\_a\_v/ (accessed 16.02.2021).

24. Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A. **2006.** *Sedimentary environments on islands in Pleistocene-Holocene*. Vladivostok: Dal'nauka, 247 p. (In Russ.).

25. Rasskazov S.V., Demonterova E.I., Ivanov A.V., Brandt I.S., Brandt S.V. **2007.** *Evolyutsiya* pozdnekaynozoyskogo magmatizma na granitse Tuvino-Mongol'skogo massiva (Vostochnaya Tuva) [Evolution of the Late Cenozoic magmatism at the boundary of the Tuva-Mongol massif (East Tuva)]. Irkutsk: IZK SO RAN, 161 p. (In Russ.).

26. Rybin A.V., Piskunov B.N. **1991.** [On petrochemical affinity of the composition of intrusive and effusive rocks of Kuril Islands (on the example of Kunashir Island)]. In: [*Geology, metallogeny, and hydrogeology of the Sakhalin and Kuril Islands*]. Vladivostok: DVO RAN = FEB RAS, 82–90. (In Russ.).

27. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V., Gur'yanov V.B. **2017.** Volcanic eruptions in the Kuril Islands during XXI century. *Vestnik DVO RAN* = *Vestnik of the Far East Branch of the RAS*, 1: 51–61. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30079298 (accessed 16.02.2021).

28. Sergeev K.F. **1976.** *Tektonika Kuril'skoy ostrovnoy sistemy* [*Tectonics of the Kuril Island system*]. Moscow: Nauka, 240 p. (In Russ.). URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-tektonika-kurilskoy-ostrovnoy-sistemy.pdf (accessed 16.02.2021).

29. Syvorotkin V.L. **1996.** Korovye vulkany Kurilo-Kamchatskoy ostrovnoy dugi [Crustal volcanoes of the Kuril-Kamchatka island arc]. Moscow: Geoinformmark, 52 p. (In Russ.).

30. Fazlullin S.M., Batoyan V.V. **1989.** [Bottom sediments of the Golovnin volcano crater lake]. *Volcanology and Seismology*, 2: 44–55. (In Russ.).

31. Fedorchenko V.I. **1962.** [Main stages of the post-Caldera period of the Golovnin volcano development (Kunashir Island)]. In: *Geologiya i geofizika* [*Geology and Geophysics*]. Yuzhno-Sakhalinsk, 127–142. (Trudy SakhK-NII; Iss. 12). (In Russ.).

32. Fedorchenko V.I., Abdurakhmanov A.I., Rodionova R.I. **1989.** *Vulkanizm Kuril'skoy ostrovnoy dugi:* geologiya i petrogenezis [Volcanism of the Kuril island arc: geology and petrogenesis]. Moscow: Nauka, 239 p. (In Russ.).

33. Frolova T.I., Burikova I.A., Gushchin A.V., Frolov V.T., Syvorotkin V.L. **1985.** *Proiskhozhdenie vulkanicheskikh seriy ostrovnykh dug* [Origin of the island arcs volcanic series]. Moscow: Nedra, 275 p. (In Russ.).

34. Frolova T.I., Perchuk L.L., Burikova I.A. 1989. Magmatizm i preobrazovanie zemnoy kory aktivnykh okrain [Magmatism and transformation of active margins of the Earth's crust]. Moscow: Nedra, 261 p. (In Russ.).

35. Belousov A., Belousova M., Kozlov D. 2017. Strong hydrothermal eruption 600 BP inside Golovnin caldera, Kunashir Island, Kurile arc. In: 19th EGU General Assembly, EGU2017: Proceedings from the conference held 23–28 April, 2017 in Vienna, Austria, p. 7596.

36. Falloon T.J., Danyushevsky L.V., Green D.H. **2001**. Peridotite melting at 1 GPa: Reversal experiments on partial melt compositions produced by peridotite-basalt sandwich experiments. *J. Petrology*, 42 (12): 2363–2390. https://doi.org/10.1093/petrology/42.12.2363

37. Kozlov D., Belousov A. **2006**. Hydrothermal eruption – the most probable scenario of volcanic disaster in the Golovnina Caldera, Kunashir Island, Southern Kuriles. In: 5th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kuril-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5) and International Volcanological Field School for Graduate Students Japan, 9–14 July 2006, Sapporo, Japan. Sapporo: Hokkaido Univ. Int., 140–141.

38. Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. **1986**. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. of Petrology*, 27(3): 745–750. https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745

39. Lee C.-T.A., Chin E.J. **2014**. Calculating melting temperatures and pressures of peridotite protoliths: implication for the origin of cratonic mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 403: 273–286. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.06.048

40. Miyashiro A. **1974**. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American J. of Science*, 274(4): 321–355. https://doi.org/10.2475/ajs.274.4.321

#### Об авторах

КАЗАКОВ Артем Иванович (ORCID 0000-0002-1378-185Х), ведущий инженер лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), г. Южно-Сахалинск, legn@inbox.ru

ВЕСЕЛОВ Олег Васильевич (ORCID 0000-0003-3151-324Х), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, o.veselov@imgg.ru

КОЗЛОВ Дмитрий Николаевич (ORCID 0000-0002-8640-086Х), кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, kozlovdn@bk.ru

#### **About the Authors**

KAZAKOV Artem I. (ORCID 0000-0002-1378-185X), Senior Engineer of the Laboratory of volcanology and volcano hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, legn@inbox.ru

VESELOV Oleg V. (ORCID 0000-0003-3151-324X), Cand. Sci. (Geol. and Miner.), Leading Researcher of the Laboratory of volcanology and volcano hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, o.veselov@imgg.ru

KOZLOV Dmitry N. (ORCID 0000-0002-8640-086X), Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher of the Laboratory of volcanology and volcano hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, kozlovdn@bk.ru Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

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

УДК 550.343(571.642)

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.027-045

# Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы

© 2021 А. С. Закупин\*, Н. В. Богинская

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

Резюме. Представлены результаты ретроспективного анализа сейсмичности Сахалина методом среднесрочного прогноза землетрясений LURR за 1997-2019 гг. Все ранее проведенные по разным исходным данным расчеты приведены к единой базе сейсмологических данных по каталогу Сахалинского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». В новом исследовании сканирование территории Сахалина выполнено, как и ранее, расчетными областями в виде окружностей радиусом в один градус, но разрешение увеличено. Вся территория покрывается такими зонами с шагом через 0.5 градуса по широте и долготе, а в трех наиболее опасных сейсмогенерирующих зонах сетка детализируется до 0.1 градуса. В результате увеличено количество расчетных выборок. Это позволило исключить пропуск аномалий параметра LURR при проведении расчетов. За счет обоснованной привязки нижней границы магнитуды для прогнозируемых событий к верхней границе диапазона магнитуд расчетной выборки (M = 5) за исследуемый период количество объектов для ретроспективного прогноза возросло в три раза. По территории острова обработаны 323 расчетные выборки (из них 119 основных и 204 детализованных). Удовлетворительное для расчета ретроспективного прогноза количество землетрясений содержали 36 основных и все детализованные выборки. Получены 15 тревожных периодов, которые территориально представляют все зоны генерации умеренных и сильных землетрясений на Сахалине. В результате 17 землетрясений из 19 с М ≥ 5 оказались в зонах с аномалиями в периоды тревоги, не превышающие 3 лет. Из 15 периодов 4 оказались ложными. Таким образом, 75 % тревог дали прогноз для 89 % землетрясений.

Ключевые слова: сейсмичность, сейсмические события, метод LURR, каталог землетрясений, аномалия, прогноз

#### Mid-term earthquake prediction using the LURR method on Sakhalin Island: A summary of retrospective studies for 1997–2019 and new approaches

Alexander S. Zakupin\*, Nataliya V. Boginskaya

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

**Abstract.** The work presents the results of a retrospective analysis of the seismicity of Sakhalin using the LURR method of mid-term earthquake prediction for 1997–2019. All previously performed computations are reduced to a single database of seismological data (catalogue) of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey of RAS". Similar to previous studies, the Sakhalin territory was scanned by applying computational areas in the form of circles with a radius of one degree; however, the resolution was increased. The entire territory was covered by such zones with a step of 0.5 degrees in latitude and longitude, with the grid being detailed down to 0.1 degrees in three most dangerous seismogenerating zones. As a result, the number of computational samples was increased, which allowed the omission of anomalies in the LURR parameter during computations to be avoided. Due to a reasonable binding of the lower bound of the magnitude for predicted events to the upper bound of the magnitude range of the

computational sample (M = 5), the number of objects for the retrospective forecast was increased by 3 times for the study period. 323 computational samples (119 of which are basic and 204 ones are detailed) were processed on the territory of the island. 15 alarm periods were obtained, which geographically represent all zones of moderate and strong earthquake generation on Sakhalin Island. As a result, 17 out of 19 earthquakes with  $M \ge 5$  occurred in the areas with anomalies during the alarm periods not exceeding three years. Out of 15 periods, 4 turned to be false. Thus, 75 % of the alarms predicted 89 % of the earthquakes.

Keywords: seismicity, seismic events, LURR method, earthquake catalogue, anomaly, forecast (prediction)

Для цитирования: Закупин А.С., Богинская Н.В. Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы. *Геосистемы переходных зон*, 2021, 5(1), с. 27–45. (Article first publ. online 20 Jan 2021. PREPRINTS.RU. https://doi. org/10.24108/preprints-3112169). https://doi.org/10.30730/ gtrz.2021.5.1.027-045

#### Введение

В последние несколько лет сотрудники Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) получили методом LURR [Yin et al., 2001] интересные результаты в области среднесрочных прогнозов землетрясений на Сахалине [Закупин и др., 2018; Закупин и др., 2020]. Так, за 1988–2019 гг. было выявлено 7 областей, в которых зафиксированы аномальные значения параметра LURR (аномалии). В этих областях затем (в сроки, не превышающие 2 лет и определяющие период тревоги) происходили сильные землетрясения. Примечательно, что часть прогнозов была сделана в реальном времени [Закупин и др., 2018; Закупин, Семенова, 2018]. Два землетрясения из семи (Онорское 14.08.2016, М = 5.8, и Крильонское 23.04.2017, M = 5.0) явились реализациями прогнозов, которые рассматривались на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (протокол № 3 от 11.05.2016, протокол № 2 от 16.03.2017). Оба прогноза были признаны полностью реализованными [Закупин и др., 2018; Закупин и др., 2020].

Авторы разработали методики по использованию алгоритма LURR, которые отличаются универсальностью в выборе параметров обработки, что обеспечивает возможность повторения полученных результатов и невозможность их «подгонки». Действительно, в отличие от работ [Yin et al., 2001; Yin et al., 2006], в которых расчетные параметры менялись для каждого прогноза (что делает невозможным оперативный прогноз), в наших работах они имеют фиксированные значения. Так, были определены: диапазон магнитуд в рабочей вы*For citation:* Zakupin A.S., Boginskaya N.V. Mid-term earthquake prediction using the LURR method on Sakhalin Island: A summary of retrospective studies for 1997–2019 and new approaches. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, 5(1), pp. 27–45. (In Russ., abstr. in Engl.). (Article first publ. online 20 Jan 2021. PREPRINTS. RU. https://doi.org/10.24108/preprints-3112169). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.027-045

борке (от 3.3 до 5), величины скользящего окна (360 дней) и сдвига (30 дней), вид и размер области для расчета (окружность радиусом в 1°). С применением перечисленных параметров в расчетах по методу LURR для разных частей о. Сахалин были получены, на наш взгляд, весьма убедительные результаты с количеством успешных ретроспективных прогнозов не менее 85 % для сильных землетрясений ( $M \ge 5.5$ ). [Закупин и др., 2018]. Нужно отметить, что для определения фиксированных значений универсальных параметров потребовалось подготовить и рассчитать несколько сотен вариантов расчетных выборок (комбинаций 5 параметров) в ручном режиме.

Однако установление степени надежности и практической применимости метода требовало уточнения исходной базы данных и некоторых параметров. Прежде всего вопрос о достоверности сейсмологических данных. Дело в том, что в разные периоды времени ретроспективный анализ основывался на разных каталогах землетрясений. Вопрос об их соответствии друг другу тогда не возникал, они применялись по принципу доступности. Первые прогнозы в 2015 г. были получены с использованием каталога под ред. Л.Н. Поплавской [Поплавская (ред.), 2006] для территории выше 52° N. Основная цель была изучить а posteriori возможность прогноза Нефтегорского землетрясения (1995 г., M = 7.2), а потому рассматривался период с 1988 по 2005 г. (последняя запись в каталоге). Результат был успешным. Более того, была обнаружена ранее не зафиксированная зона тревоги (ретроспективный прогноз) для Пильтунского землетрясения (2005 г., M = 5.5). Для анализа южной части острова применялся каталог локальной сети Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) (он отличается от итоговых данных, публикуемых в ежегодных сборниках и составляющих так называемый официальный каталог). С его помощью был получен ретроспективный анализ Невельского землетрясения (2007 г., M = 6.2), а также установлено отсутствие зоны тревоги для Горнозаводского землетрясения (2006 г., М = 5.6). Для анализа северной части Сахалина после 2005 г. был использован локальный каталог ИМГиГ ДВО РАН [Stepnov et al., 2014], источником данных для которого служили 5 станций, сгруппированных от Арги-Паги до Охи практически в линию. Как выяснилось позже, по качеству полученных по нему прогнозов он значительно уступал каталогу сети СФ ФИЦ ЕГС РАН, что и было показано в одной из недавних наших работ [Закупин, Богинская, 2020]. С помощью каталога ИМГиГ ДВО РАН были получены зоны тревоги для Уангского (2010 г., М = 5.4) и Онорского (2016 г., М = 5.8) землетрясений. И наконец, с 2017 г. мы применяем в расчетах официальный каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН, который формируется с 1997 г. и непрерывно пополняется в виде ежегодных выпусков (например, [Сохатюк и др., 2016]). С помощью этого каталога выявлена зона тревоги для Крильонского землетрясения (2017 г., М = 5.0).

Такое разнообразие первичных данных, безусловно, требовало проверки достоверности результатов, а также универсальности методики. Тем более что Углегорское землетрясение (2000 г., M = 7), считавшееся пропущенным, в 2020 г. оказалось ретроспективно прогнозируемым (рассчитано по данным двух каталогов). Предпочтительным вариантом стало применение каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН, который содержит данные для всех районов Сахалина и дает возможность проверить все ранее полученные результаты.

Второй аспект аргументированности наших результатов связан с магнитудой проверяемого (прогнозируемого) землетрясения. Верхний предел ожидаемого события определялся по сейсмотектоническим моделям с зонами возможных очагов землетрясений (ВОЗ) [Левин и др., 2012]. С нижним пределом не все было очевидно. Казалось бы, если рабочая выборка имеет верхней границей M = 5, то и нижним пределом прогноза следовало бы установить такую же магнитуду. Но с учетом того, что все наши зоны тревог были получены для сильных землетрясений с M > 5.5, мы определили его в  $M \ge 5.5$  – видимо, стремясь таким образом избежать очевидных пропущенных целей. Однако, когда в 2017 г. в зоне тревоги LURR в районе п-ова Крильон произошло землетрясение с M = 5, стало ясно, что при соблюдении определенного нами магнитудного порога этот факт должен квалифицироваться не как удачный прогноз, а как ложная тревога. Значит, нижний порог ожидания можно обоснованно увязать с верхней границей рабочей выборки и считать его M = 5.

Далее необходимо было провести расчеты на всей территории острова, с убедительным количеством выборок, и определить порог отсечения аномалий (уровень дискриминации на графиках распределения параметра LURR). Порог отсечения аномалий можно не просто установить выше 1 (как в работах [Yin et al., 2001; Yin et al., 2006]), а опереться на правило трех сигм (утверждающее, что вероятность того, что случайная величина отклонится от своего математического ожидания более чем на три среднеквадратических отклонения, практически равна нулю). В теории LURR в фоновом процессе математическое ожидание единица, следовательно, этот порог просто равен трем.

Ну и наконец, время тревоги. Ранее на основе ретроспективного анализа мы остановились на двух годах. В данной работе на основе полученных результатов зафиксируем реальные значения постфактум.

В работе использован названный выше единый каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН, который признан научным сообществом в России. Проведение расчетов на единой базе сейсмологических данных, естественно, обусловило некоторые корректировки ранее полученных результатов.

В статье анализируется и переосмысляется шестилетний опыт работ, проведенных группой ученых-сейсмологов на о. Сахалин. Детальное описание сущности метода, обилие первичных данных, расчетов в виде карт и таблиц продиктованы стремлением сделать прозрачным весь алгоритм применения метода, не имеющего пока единой общепринятой методики.

#### Обработка данных и инструменты анализа

#### Сейсмические каталоги

Используемый в данной статье каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН начиная с 1997 г. отражает все происходящие сейсмические события, каждое из которых имеет конкретную запись в определенном пункте на определенной аппаратуре, включающую параметр гипоцентра, магнитуду, энергетический класс, механизм очагов по инструментальным наблюдениям, а также макросейсмические данные. Периодические данные для каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН в настоящее время выпускаются в ежегодных сборниках и серийном издании «Землетрясения России».

Для расчетов по методу LURR необходимы длинные ряды сейсмологических сводок в широком магнитудном диапазоне. Учитывая, что в каталогах СФ ФИЦ ЕГС РАН применяются разные магнитудно-энергетические шкалы, встала острая необходимость систематизации и унификации данных по энергетическому значению.

В практике сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке РФ для оценки величины землетрясений применяются разные магнитудно-энергетические шкалы и энергетические классы Кс [Соловьев, Соловьева, 1967] и Кр [Раутиан, 1960 а, б]. Для единой классификации событий по каталогу СФ ФИЦ ЕГС РАН за период 1997–2019 гг. авторы данного исследования пересчитали значения энергетических классов Кс и Кр неглубокофокусных землетрясений о. Сахалин в локальную магнитуду ML по формулам [Соловьев, Соловьева, 1967] и [Раутиан, 1960 а, б]: ML = (Кс – 1.2)/2 и ML = (Кр – 4)/1.8.

Так как авторам для исследования не было необходимости использовать глубокофокусные землетрясения, то пересчет магнитуд для них не проводился, учитывали ту магнитуду (MSH или MSH(A)), какая представлена в изначальном каталоге СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Отметим, что непрерывно пополняемый путем периодических изданий каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН позволяет применять данные, обладающие преемственностью в плане подготовки и обработки, что очень важно для будущих прогнозов.

#### Программы и методы обработки

В названии метода LURR (load-unload response ratio) отражен физический подход – изучение отношения откликов среды в услови-

ях нагрузки и разгрузки. Отклик среды – это землетрясение, а влияние внешних сил на напряженно-деформированное состояние в его очаге - это сумма тектонических, литостатических и приливных компонент. Подвижка в очаге происходит очень быстро, практически мгновенно, и медленно меняющиеся компоненты, такие как тектоническая и литостатическая составляющие, не влияют на динамику напряжений. Другое дело приливные напряжения – при небольших абсолютных значениях они имеют высокий градиент и могут быть использованы как стабильный, калиброванный инструмент оценки состояния нагрузки и разгрузки в очаге. В работе [Закупин и др., 2020] физические принципы и основные математические формулы мы привели на русском языке максимально близко к оригиналу [Yin et al., 2001; Yin et al., 2006], а в данном разделе пошагово опишем алгоритм расчета, основанный на подходах, описанных в этих работах. Однако прежде чем это сделать, изложим принципы выбора данных для проведения расчета.

Для обработки данных методом LURR применялся разработанный в ИМГиГ ДВО РАН [Закупин, 2016] запатентованный программный комплекс Seis-ASZ. Территория Сахалина была разбита на 119 зон (окружностей радиусом 1°) с шагом в 0.5° по широте и долготе. Устойчивость аномалий также проверяется на сетке в южном сегменте с шагом детализации через 0.1°. В каждой зоне определяется общее количество землетрясений и количество землетрясений в рабочей выборке (M = 3.3–5.0). Представительность рабочей выборки для анализа ограничена средним количеством событий – не менее 10-15 в год (меньшее количество при окне в 360 дней гарантирует случайные выбросы). За 22 года такой порог может составлять около 300 событий. В табл. 1 приведены параметры для всех расчетных областей, зеленым цветом отмечены зоны, для которых расчет может быть проведен, а розовым – недопустимые для расчета.

В итоге всего 36 зон из 119 можно использовать для расчета. Наименьшую представительность имеют центральные области, по этой причине мы ранее не включали их в зону анализа, однако отметим, что несколько областей в районе г. Углегорск (и одноименного землетрясения) пригодны к расчету. На рис. 1 рассмотрены примеры расчета в двух областях для демонстрации определения порога, а также для классификации аномалий.

Зона (центр)	46.0 N, 141.0 E	46.0 N, 141.5 E	46.0 N, 142.0 E	46.0 N, 142.5 E	46.0 N, 143.0 E	46.0 N, 143.5 E	46.0 N, 144.0 E
Всего событий	542	2091	2324	1814	851	330	147
M = 3.3 - 5	137	458	520	382	249	163	89
Зона (центр)	46.5 N, 141.0 E	46.5 N, 141.5 E	46.5 N, 142.0 E	46.5 N, 142.5 E	46.5 N, 143.0 E	46.5 N, 143.5 E	46.5 N, 144.0 E
Всего событий	1588	2469	3082	3401	1683	613	207
M = 3.3 - 5	335	474	569	640	327	144	68
Зона (центр)	47.0 N, 141.0 E	47.0 N, 141.5 E	47.0 N, 142.0 E	47.0 N, 142.5 E	47.0 N, 143.0 E	47.0 N, 143.5 E	47.0 N, 144.0 E
Всего событий	1433	2396	3258	3241	1603	886	223
M = 3.3 - 5	322	420	539	532	219	131	39
Зона (центр)	47.5 N, 141.0 E	47.5 N, 141.5 E	47.5 N, 142.0 E	47.5 N, 142.5 E	47.5 N, 143.0 E	47.5 N, 143.5 E	47.5 N, 144.0 E
Всего событий	338	1843	2727	2123	1445	837	173
M = 3.3 - 5	98	378	486	310	193	118	31
Зона (центр)	48.0 N, 141.0 E	48.0 N, 141.5 E	48.0 N, 142.0 E	48.0 N, 142.5 E	48.0 N, 143.0 E	48.0 N, 143.5 E	48.0 N, 144.0 E
Всего событий	166	645	1378	1479	943	322	83
M = 3.3 - 5	38	174	347	377	208	64	21
Зона (центр)	48.5 N, 141.0 E	48.5 N, 141.5 E	48.5 N, 142.0 E	48.5 N, 142.5 E	48.5 N, 143.0 E	48.5 N, 143.5 E	48.5 N, 144.0 E
Всего событий	267	683	996	994	714	260	67
M = 3.3 - 5	85	236	337	340	263	82	24
Зона (центр)	49.0 N, 141.0 E	49.0 N, 141.5 E	49.0 N, 142.0 E	49.0 N, 142.5 E	49.0 N, 143.0 E	49.0 N, 143.5 E	49.0 N, 144.0 E
Всего событий	253	748	1006	1022	680	184	30
M = 3.3 - 5	82	265	370	365	259	83	17
Зона (центр)	49.5 N, 141.0 E	49.5 N, 141.5 E	49.5 N, 142.0 E	49.5 N, 142.5 E	49.5 N, 143.0 E	49.5 N, 143.5 E	49.5 N, 144.0 E
Всего событий	121	490	864	835	456	104	36
M = 3.3 - 5	38	160	325	332	187	58	20
Зона (центр)	50.0 N, 141.0 E	50.0 N, 141.5 E	50.0 N, 142.0 E	50.0 N, 142.5 E	50.0 N, 143.0 E	50.0 N, 143.5 E	50.0 N, 144.0 E
Всего событий	62	249	372	423	300	136	49
M = 3.3 - 5	22	83	142	183	136	71	27
Зона (центр)	50.5 N, 141.0 E	50.5 N, 141.5 E	50.5 N, 142.0 E	50.5 N, 142.5 E	50.5 N, 143.0 E	50.5 N, 143.5 E	50.5 N, 144.0 E
Всего событий	9	196	368	380	274	121	70
M = 3.3 - 5	36	83	146	156	130	65	36
Зона (центр)	51.0 N, 141.0 E	51.0 N, 141.5 N	51.0 N, 142.0 E	51.0 N, 142.5 E	51.0 N, 143.0 E	51.0 N, 143.5 E	51.0 N, 144.0 E
Всего событий	30	188	342	430	372	148	65
M = 3.3 - 5	11	77	149	183	167	69	28
Зона (центр)	51.5 N, 141.0 E	51.5 N, 141.5 E	51.5 N, 142.0 E	51.5 N, 142.5 E	51.5 N, 143.0 E	51.5 N, 143.5 E	51.5 N, 144.0 E
Всего	60	249	453	520	392	197	49
M = 3.3 - 5	24	119	216	253	173	90	22
Зона (центр)	52.0 N, 141.0 E	52.0 N, 141.5 E	52.0 N, 142.0 E	52.0 N, 142.5 E	52.0 N, 143.0 E	52.0 N, 143.5 E	52.0 N, 144.0 E
Всего событий	78	269	706	982	893	454	62
M = 3.3 - 5	33	146	334	500	448	221	31
Зона (центр)	52.5 N, 141.0 E	52.5 N, 141.5 E	52.5 N, 142.0 E	52.5 N, 142.5 E	52.5 N, 143.0 E	52.5 N, 143.5 E	52.5 N, 144.0 E
Всего событий	65	237	922	1170	1094	732	57
M = 3.3 - 5	26	139	484	617	578	381	35
Зона (центр)	53.0 N, 141.0 E	53.0 N, 141.5 E	53.0 N, 142.0 E	53.0 N, 142.5 E	53.0 N, 143.0 E	53.0 N, 143.5 E	53.0 N, 144.0 E
Всего событий	39	115	989	1029	933	769	60
M = 3.3 - 5	19	51	521	535	481	419	34
Зона (центр)	53.5 N, 141.0 E	53.5 N, 141.5 E	53.5 N, 142.0 E	53.5 N, 142.5 E	53.5 N, 143.0 E	53.5 N, 143.5 E	53.5 N, 144.0 E
Всего событий	45	128	500	880	808	460	45
M = 3.3 - 5	20	51	249	462	433	241	29
Зона (центр)	54.0 N, 141.0 E	54.0 N, 141.5 E	54.0 N, 142.0 E	54.0 N, 142.5 E	54.0 N, 143.0 E	54.0 N, 143.5 E	54.0 N, 144.0 E
Всего событий	65	151	289	404	373	98	15
M = 3.3 - 5	30	62	144	201	188	53	8

Таблица 1. Расчетные зоны (выделены зеленым) для Сахалина (каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН 1997–2019 гг.) Table 1. Computational areas for Sakhalin (the catalog of 1997–2019 of SB FRC UGS RAS)



**Рис. 1**. Примеры расчета параметра LURR для областей с центрами: (a) 48.5° N, 142.5° E, (b) 47.0° N, 141.5° E. **Figure 1.** Examples of computing the LURR parameter for the areas with centers: (a) 48.5° N, 142.5° E, (b) 47.0° N, 141.5° E.

Резкие скачки, которые дают превышение порога величиной 3 (правило трех сигм) всего за счет одной расчетной точки, могут носить случайный характер. Такие одиночные аномалии, импульсного типа, не фиксируются как предвестники (пример на рис. 1 а), однако если есть череда таких импульсов (подряд), то их можно считать аномалией. Составная аномалия, на которой выделяется нескольких пиков (пример на рис. 1 б, три пика) и которая носит продолжительный характер, считается одним целым, если при переходе от пика к пику параметр не вернулся к фоновым значениям. Время появления такой аномалии считается по выходу за установленный предел (3) первого пика. На левом графике в итоге 3 аномалии, на правом всего одна.

Алгоритм расчета методом LURR продемонстрируем на расчетной области (на карте в форме эллипса) с координатами (центром эллипса) 48.5° N, 142.5° E (рис. 1 а).

Из 994 событий, попадающих в данный эллипс, в рабочем диапазоне находятся 340 землетрясений (табл. 1). На первом этапе для каждого из них выполняются следующие действия. В эпицентре каждого землетрясения рассчитываются компоненты приливных смещений, формируемых гравитационным потенциалом при взаимодействии системы из трех объектов: Земля-Солнце-Луна. На основании модели жесткой и упругой Земли (с тремя упругими константами) рассчитываются компоненты тензора напряжений. По матрице направляющих косинусов (по углам dip, strike и rake) они приводятся к площадке (так называемая нодальная плоскость), на которой располагается вектор скольжения в момент времени, когда произошло расчетное землетрясение. Напряжения рассчитываются в нескольких точках до, во время и после землетрясения таким образом, чтобы определить динамику изменения приливной компоненты.

Полученные напряжения используются для расчета критерия разрушения Кулона– Мора и определения динамики эффективного касательного напряжения (т). В итоге мы получаем для каждого землетрясения определение, какую роль приливные возмущения играли в момент разрыва (или подвижки) – снижали или увеличивали эффективное касательное напряжение. Землетрясения первого типа становятся условно «отрицательными», а второго – «положительными».

На заключительном этапе проводится расчет параметра LURR. На этом этапе расчеты разных исследователей могут различаться, так как параметры расчетной модели могут быть выбраны разные. Расчет выполняется суммированием в заданном окне (у нас оно постоянно и равно 360 дней) значений заданного параметра (мы выбрали энергию Беньоффа) для всех «положительных» и всех «отрицательных» землетрясений в области (340 событий), а затем вычислением отношения этих сумм. В расчетном периоде (22 года) окно перемещается с шагом в 30 дней (также наш выбор), т.е. количество точек (значений параметра LURR) на графике больше 250. Именно эти значения и наносятся на график. Важно помнить, что точка на графике ставится в середине окна осреднения, т.е. фактические данные в расчете используются с лагом на полгода вперед.

Для нашего примера на рис. 1 а аномалии фиксируются по времени первого превышения заданного дискриминатора – 11.09.2005, 23.12.2008 и 16.02.2016.

Для определения целей прогноза (землетрясений с M ≥ 5) необходимо провести декластеризацию. Декластеризация выполнена с помощью вычислительных программ кластеров идентификации землетрясений в четырех вариантах [Gardner, Knopoff, 1974; Uhrhammer 1986; Reasenberg, 1985; Grünthal et al., 2009]. Использовался программный комплекс ZMAP [Wiemer, 2001], в котором все четыре алгоритма реализованы. В исходном каталоге (1997-2019 гг.) имеется 7115 событий. Из них 28 событий с M ≥ 5 (не считая глубокофокусные землетрясения, которые в методе LURR не рассматриваются как прогнозные). После декластеризации таковых осталось 19. По 18 из них были получены полностью согласованные результаты по всем четырем алгоритмам декластеризации, и лишь одно сохраняется в двух случаях и исключено в двух других. Тем не менее, мы включаем в анализ все 19 землетрясений.

#### Результаты и обсуждение

На основе анализа полученных распределений параметра LURR для 36 расчетных областей по каталогу 1997–2019 гг. в них были выделены аномалии, для каждой из которых приведено время появления (первая точка после превышения уровня дискриминации) (табл. 2). Всего в этих зонах за 22 года выявлено 77 аномалий, они были сгруппированы по времени и пространству.

Цветом в табл. 2 выделены аномалии, которые появляются на периодах не более 2 лет, это позволяет объединить их в группы по времени. Каждая группа подразделяется на подгруппы – области, которые расположены рядом, образуют объединенные области прогноза, и в них выделяется период тревоги (с момента появления первой аномалии

Таблица 2. Аномалии LURR по расчетным областям (по каталогу СФ ФИЦ ЕГС РАН 1997–2019) и время их появления (шаг 0.5°)

Table 2. The LURR anomalies	by computational areas (the	e catalog of 1997-2019	of SB FRC UGS RAS) a	and their
occurrence time (step 0.5°)		_		

Зона (центр)	Время появления аномалии LURR	Зона (центр)	Время появления аномалии LURR
46.0 N, 141.5 E	25.01.2000; 10.07.2002; 01.08.2015	48.5 N, 142.5 E	11.09.2005; 23.12.2008; 16.02.2016
46.0 N, 142.0 E	19.12.1999; 01.05.2002; 26.07.2015	49.0 N, 142.0 E	25.12.2008; 20.10.2015
46.0 N, 142.5 E	22.01.2000	49.0 N, 142.5 E	25.12.2008; 20.11.2015
46.5 N, 141.0 E	09.05.2007; 19.03.2011; 27.05.2015; 14.01.2018	49.5 N, 142.0 E	12.02.2000; 19.08.2015; 04.10.2018
46.5 N, 141.5 E	15.08.1999; 09.04.2001	49.5 N, 142.5 E	26.11.2008
46.5 N, 142.0 E	23.10.1999; 09.04.2001; 27.06.2001	52.0 N, 142.0 E	17.06.2001; 28.08.2004; 14.12.2007; 07.06.2014
46.5 N, 142.5 E	22.01.2000	52.0 N, 142.5 E	28.08.2004; 05.08.2014
46.5 N, 143.0 E	23.06.2009	52.0 N, 143.0 E	28.08.2004; 05.08.2014
47.0 N, 141.0 E	14.09.2006	52.5 N, 142.0 E	06.02.2014; 23.11.2016; 15.04.2018
47.0 N, 141.5 E	10.01.2018	52.5 N, 142.5 E	03.08.2014; <mark>23.11.2016</mark>
47.0 N, 142.0 E	06.07.2018	52.5 N, 143.0 E	05.09.2014; 23.11.2016; 15.04.2018
47.0 N, 142.5 E	-	52.5 N, 143.5 E	28.08.2004; 04.03.2009; 05.09.2014; 23.11.2016; 17.06.2018
47.5 N, 141.5 E	<mark>20.04.2016</mark> ; 06.07.2018	53.0 N, 142.0 E	04.07.2014; <mark>23.11.2016</mark> ; 15.04.2018
47.5 N, 142.0 E	<mark>16.01.2001</mark> ; 10.04.2018	53.0 N, 142.5 E	04.07.2014; <mark>23.11.2016</mark> ; 15.04.2018
47.5 N, 142.5 E	01.08.2003; 04.12.2008; 25.06.2016; 15.04.2018	53.0 N, 143.0 E	04.07.2014; 23.11.2016; 15.04.2018
48.0 N, 142.0 E	10.09.2005; 22.12.2008; 14.06.2010; 15.02.2016; 04.02.2018	53.0 N, 143.5 E	<mark>23.11.2016</mark> ; 15.04.2018
48.0 N, 142.5 E	28.10.2008; 20.02.2016; 08.04.2018	53.5 N, 142.5 E	06.07.2008; 12.11.2016; 15.07.2018
48.5 N, 142.0 E	11.09.2005; 23.12.2008; 18.11.2015	53.5 N, 143.0 E	23.11.2016; 15.04.2018
в подгруппе). Например, желтый цвет – это три периода тревоги: 1) семь областей с аномалиями на юге острова, появлявшихся с августа 1999 по июнь 2001 г., создают зону тревоги с 45.0° по 47.5° N. Реализацией для периода тревоги в этом районе стало землетрясение в 2001 г. (Такойский рой); 2) область с аномалией в феврале 2000 г. в центральной части острова (49.5° N, 142.0° E). Реализацией стало Углегорское землетрясение в августе 2000 г.; 3) область с аномалией в июне 2001 г. в северной части острова (52.0° N, 142.0° E). Это тот случай, когда после появления аномалии в течение 3 лет землетрясений в области не произошло и зафиксирована ложная тревога.

Другой пример – это бирюзовый цвет: аномалии в 12 областях с мая 2015 по июнь 2016 г. и один тревожный период (все зоны перекрываются). Область прогноза очень большая – весь центральный и южный Сахалин. Реализацией стали Онорское землетрясение в 2016 г. и Крильонское в 2017 г. соответственно.

Всего за 22 года в разных частях острова установлено 15 периодов тревоги, причем они были представлены разным количеством расчетных областей и, соответственно, разной площадью территорий, которые они занимали. Результаты показаны на картах ниже (рис. 2–5), на них же нанесены землетрясения ближайшие по времени к периодам тревоги (не позднее 3 лет после появления аномалии). Если землетрясение попадает в область прогноза, то оно считается ретроспективно спрогнозированным, а если нет, то пропущенным.

Расчеты, как сказано выше, проведены для областей со смещением по широте и долготе в 0.5°. Конечно, возникает вопрос о детальности: как сильно дальнейшее уменьшение шага скажется на результате. Для проверки устойчивости аномалий в отдельно взятой области необходимо изучить поведение параметра LURR в областях, отстоящих на максимально возможное близкое расстояние друг от друга. Мы провели детальное сканирование (с шагом 0.1°) нескольких участков с наибольшей плотностью сейсмических событий расчетных выборок (зоны Углегорского, Нефтегорского и Невельского землетрясений). На двух участках преемственность сохранялась, т.е. новых аномалий не появлялось, а старые аномалии (находящиеся в узловых зонах) присутствовали.

Исключением стал участок, где расположены эпицентры Невельского и Горнозаводского

землетрясений. Эти два землетрясения по времени появляются с разницей в один год, а расположены недалеко друг от друга. В целом сложный случай с точки зрения прогноза при осреднении ряда окном 360 дней в области размером 200 км. Любая область с аномалией в данном районе начиная с 2004 г. может быть прогнозной для обоих землетрясений. Отметим, что ранее для Горнозаводского землетрясения аномальный период зафиксирован не был [Закупин и др., 2018]. В результате расчетов в 68 областях (табл. 3) определено, что аномалии в узловых (совпадают с табл. 2) и промежуточных точках одинаковы, т.е. 6 аномалий (1999–2001, 2002, 2007, 2011, 2015, 2018 гг.) повторяются в узлах и присутствуют в сегменте. Различия отмечены для областей промежуточных лишь на одном периоде – в 5 случаях появилась новая аномалия 2004 г. В табл. 3 периоды появления аномалий сгруппированы также по цветам, а самый массовый 1999-2001 гг. оставлен незакрашенным. В качестве рекомендации для дальнейших исследований можно предложить практику такой детализации (позволившей выявить дополнительные аномалии для прогноза Горнозаводского землетрясения), однако это существенно увеличивает затраты ресурсов.

В табл. 4 показаны 19 землетрясений, которые остались в нашем каталоге после декластеризации. Серым цветом выделены землетрясения, перед которыми аномалии зафиксированы не были. Не выделены цветом события, перед которыми есть аномалии и которые расположены в тревожных зонах. К ним также причислены два землетрясения (№ 7 и № 13), которые немного (не более 15 км) отклоняются от зоны тревоги, но по времени соответствуют наблюдаемым перед ними аномалиям. В итоге из 19 землетрясений 17 попадают в области тревоги (табл. 3). Периоды тревоги для каждого землетрясения в табл. 4 выделены по первой  $(\tau_1)$  точке при выходе аномалии за уровень дискриминации (Т1) и последней точке (т) перед возвращением параметра к фоновым значениям (Т2). Например, на юге ряд аномалий из семи областей «желтой» группы (табл. 3) появляется в конце 1999 г. и завершается уже в 2001, а те, что появляются в 2000, также завершаются в 2001 г. Большинство аномалий имеют, как правило, длительность несколько месяцев (некоторые доходят до года). Если в данном случае период тревоги отсчитывать от  $\tau_2$  (T2),

Таблица 3. Аномалии LURR в локальной области 46.0° N, 141.0° E – 46.5° N, 142.0° E по каталогу СФ ФИЦ ЕГС РАН 1997–2019 гг. и время их появления (шаг 0.1°) *Table 3.* The LURR anomalies in the local area 46.0° N, 141.0° E – 46.5° N, 142.0° E according to the catalog of 1997–2019 of SB FRC UGS RAS and their occurrence time (step 0.1°)

Зона (центр)	Время появления аномалии LURR	Зона (центр)	Время появления аномалии LURR
46.0 N, 141.0 E	15.08.2010; 20.07.2015; 08.01.2018	46.3 N, 141.0 E	<mark>09.05.2007</mark> ; 26.01.2010; 19.03.2011; 27.05.2015; 14.01.2018
46.0 N, 141.1 E	<mark>09.05.2007</mark> ; <mark>13.04.2011</mark> ; <mark>20.07.2015</mark> ; 08.01.2018	46.3 N, 141.1 E	19.12.1999; <mark>19.03.2011</mark> ; <mark>27.07.2015</mark> ; 14.01.2018
46.0 N, 141.2 E	19.12.1999; <mark>09.05.2007</mark> ; 26.07.2015	46.3 N, 141.2 E	19.12.1999; <mark>27.05.2015</mark>
46.0 N, 141.3 E	19.12.1999; <mark>26.07.2015</mark>	46.3 N, 141.3 E	19.12.1999; 11.04.2001
46.0 N, 141.4 E	19.12.1999	46.3 N, 141.4 E	19.12.1999; 11.04.2001; <mark>23.08.2004</mark>
46.0 N, 141.5 E	19.12.1999; <mark>01.05.2002</mark> ; 01.08.2015	46.3 N, 141.5 E	19.12.1999; 11.04.2001; <mark>24.01.2004</mark>
46.0 N, 141.6 E	19.12.1999; 01.05.2002; 23.08.2004	46.3 N, 141.6 E	19.12.1999; 11.04.2001
46.0 N, 141.7 E	19.12.1999; <mark>01.05.2002</mark> ; <mark>23.08.2004</mark> ; 26.07.2015	46.3 N, 141.7 E	09.01.2001
46.0 N, 141.8 E	19.12.1999; <mark>01.05.2002</mark> ; 26.07.2015	46.3 N, 141.8 E	09.01.2001
46.0 N, 141.9 E	19.12.1999; <mark>01.05.2002</mark> ; 26.07.2015	46.3 N, 141.9 E	09.01.2001
46.0 N, 142.0 E	19.12.1999; <mark>01.05.2002</mark> ; 26.07.2015	46.3 N, 142.0 E	15.08.1999; 09.01.2001; 01.05.2002
46.1 N, 141.0 E	<mark>04.03.2007</mark> ; <mark>13.04.2011</mark> ; <mark>20.07.2015</mark> ; 08.01.2018	46.4 N, 141.0 E	<mark>09.05.2007</mark> ; <mark>19.03.2011</mark> ; <mark>27.05.2015</mark> ; 14.01.2018
46.1 N, 141.1 E	<mark>09.05.2007</mark> ; <mark>19.03.2011</mark> ; <mark>26.07.2015</mark> ; 14.01.2018	46.4 N, 141.1 E	<mark>09.05.2007</mark> ; <mark>19.03.2011</mark> ; <mark>27.05.2015</mark> ; 14.01.2018
46.1 N, 141.2 E	19.12.1999; <mark>26.07.2015</mark>	46.4 N, 141.2 E	19.12.1999; 11.04.2001; <mark>27.05.2015</mark> ; 14.05.2018
46.1 N, 141.3 E	19.12.1999; <mark>26.07.2015</mark>	46.4 N, 141.3 E	09.04.2001
46.1 N, 141.4 E	19.12.1999; <mark>26.07.2015</mark>	46.4 N, 141.4 E	09.04.2001; <mark>24.01.2004</mark>
46.1 N, 141.5 E	19.12.1999; <mark>27.05.2015</mark>	46.4 N, 141.5 E	09.04.2001
46.1 N, 141.6 E	19.12.1999; <mark>27.05.2015</mark>	46.4 N, 141.6 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.1 N, 141.7 E	19.12.1999	46.4 N, 141.7 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.1 N, 141.8 E	19.12.1999	46.4 N, 141.8 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.1 N, 141.9 E	19.12.1999	46.4 N, 141.9 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.1 N, 142.0 E	19.12.1999; 01.05.2002	46.4 N, 142.0 E	15.08.1999; 09.04.2001; 07.11.2002
46.2 N, 141.0 E	19.12.1999; <mark>09.05.2007</mark> ; <mark>19.03.2011</mark> ; 27.05.2015; 14.01.2018	46.5 N, 141.0 E	<mark>09.05.2007</mark> ; <b>19.03.2011</b> ; <b>27.05.2015</b> ; 14.01.2018
46.2 N, 141.1 E	19.12.1999; <mark>09.05.2007</mark> ; <mark>19.03.2011</mark> ; <mark>27.07.2015</mark> ; 14.01.2018	46.5 N, 141.1 E	<mark>09.05.2007</mark> ; 19.03.2011; 27.05.2015; 14.01.2018
46.2 N, 141.2 E	19.12.1999; <mark>26.07.2015</mark>	46.5 N, 141.2 E	19.12.1999; 11.04.2001; 14.05.2018
46.2 N, 141.3 E	19.12.1999; <mark>26.07.2015</mark>	46.5 N, 141.3 E	09.04.2001
46.2 N, 141.4 E	19.12.1999; 11.04.2001; <mark>26.07.2015</mark>	46.5 N, 141.4 E	09.04.2001
46.2 N, 141.5 E	19.12.1999; 11.04.2001	46.5 N, 141.5 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.2 N, 141.6 E	19.12.1999	46.5 N, 141.6 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.2 N, 141.7 E	19.12.1999	46.5 N, 141.7 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.2 N, 141.8 E	19.12.1999	46.5 N, 141.8 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.2 N, 141.9 E	19.12.1999	46.5 N, 141.9 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.2 N, 142.0 E	19.12.1999; 01.05.2002	46.5 N, 142.0 E	23.10.1999; 09.04.2001; 27.06.2001

то он на 325 дней меньше, чем тот же период, но отсчитываемый от  $\tau_1$  (T1). Отметим, что и в других группах периоды тревоги также существенно снижаются, если применять отсчет периода тревоги от  $\tau_2$  (табл. 4). С точки зрения физических основ метода тревогу следует объявлять уже после первых признаков появления аномалии (T1), однако во всех наших примерах не установлено ни одной реализации прогноза до момента, когда аномалии завершаются и параметр возвращается к фоновым значениям. Соответственно, можно разделить уровни оповещения на два типа – красный (Т2) и желтый (Т1).

Результаты группируем по географическому принципу, но стараемся придерживаться естественного временного хода.

1. Аномалия зарегистрирована в пределах 49.5° N, 142.0° E (рис. 2) в феврале 2000 г. Очевидная и довольно быстрая реализация – Угле-

	1				8							0
Nº	Дата Время	М	°N	°E	Название землетрясения. Географическая позиция	P <sub>15</sub>	P <sub>100</sub>	ГК	У	Гр	Т1, дни	Т2, дни
1	04.08.2000	7	48.64	142.18	Углегорское	+	+	+	+	+	170	26
2	01.09.2001	5.2	47.3	142.66	Такойский рой	+	+	+	+	+	739	314
3	08.03.2005	5.1	52.26	141.79	Район мыса Погиби	+	+	+	+	+	299	239
4	12.06.2005	5.5	52.86	144.18	Пильтунское	+	+	+	+	+	389	329
5	17.08.2006	5.6	46.55	141.85	Горнозаводское	+	+	+	+	+	331	241
6	02.08.2007	6.2	46.83	141.81	Невельское	+	+	+	+	+	83	25
7	21.09.2007	5	47.26	142.76	Между Соколом и Такое	+	+	+	+	+	741	655
8	16.03.2010	5.4	52.19	142.41	Уангское	+	+	+	+	+	820	610
9	16.02.2010	5	49	141.34	В Татарском проливе 50 км на запад от Углегорска	+	+	+	+	+	425	240
10	23.06.2011	5	49.17	142.84	15 км к ЮЗ от Поронайска	+	+	+	+	+	951	773
11	12.10.2011	5.3	49.22	142.28	14 км на СВ от Шахтерска	+	+	+	+	+	1054	910
12	02.12.2011	5.2	48.84	141.88	28 км к югу от Углегорска (в проливе у с. Орлово)	+	+	+	+	+	1104	960
13	12.12.2011	5.6	50.63	143.1	Тымовское	+	+	+	+	+	1114	970
14	29.12.2011	5.1	48.92	142.22	20 км на ЮВ от Углегорска (Краснополье)	+	+	_	+	-	1131	953
15	21.10.2012	5	53.36	142.56	37 км к ЮЗ от Охи.	+	+	+	+	+	_	
16	25.11.2013	5.1	45.88	141.79	26 км на ЮЗ от мыса Крильон	+	+	+	+	+	970	730
17	19.02.2014	5	52.18	142.58	Около пос. Ноглики	+	+	+	+	+	-	-
18	14.08.2016	5.8	50.32	142.49	Онорское	+	+	+	+	+	360	193
19	23.04.2017	5	46	142.05	Крильонское	+	+	+	+	+	632	602

Таблица 4. Землетрясения с М ≥ 5 в каталоге СФ ФИЦ ЕГС РАН 1997–2019 гг. после декластеризации
Table 4. The earthquakes with $M > 5$ in the catalog of 1997–2019 of SB FRC UGS RAS after the declastering

Примечания. Р<sub>15</sub> и Р<sub>100</sub> – алгоритм Ризенберга [Reasenberg, 1985] в двух вариантах, при г = 15 км и г = 100 км (r – interaction radius factor), ГК – алгоритм Гарднера–Кнопова [Gardner, Knopoff, 1974], У – алгоритм Урхаммера [Uhrhammer, 1986], Гр – алгоритм Грюнделя [Grünthal et al., 2009]. Т1 и Т2 – периоды тревоги, отсчитываемые, соответственно, от первой точки ( $\tau_1$ ) выхода параметра LURR из фоновых значений или от последней точки ( $\tau_2$ ) перед возвращением параметра LURR к фоновому уровню. Серым цветом выделены землетрясения, перед которыми аномалии зафиксированы не были.

*Note.*  $P_{15}$  and  $P_{100}$  is the Reasenberg algorhitm [Reasenberg, 1985] in two variants when r = 15 km and r = 100 km (r – interaction radius factor),  $\Gamma K$  – the Gardner-Knopoff algorhitm [Gardner, Knopoff, 1974], V – the Uhrhammer algorhitm [Uhrhammer, 1986],  $\Gamma p$  – the Grünthal algorhitm [Grünthal et al., 2009]. T1  $\mu$  T2 – alarm periods counted, respectively, from the first point ( $\tau_1$ ) of the LURR parameter outside the background values or from the last point before the LURR parameter returns to the background level. The earthquakes, before which no anomalies have been recorded, are highlighted in gray.

горское землетрясение 4.08.2000, M = 7 ( $N_{2}$  1), эпицентр которого находится в области с аномалией LURR. Отметим, что это самое большое по величине магнитуды землетрясение в рассматриваемом периоде (табл. 4).

2. Разделенные формально по времени, но проявившиеся в 7 соседних областях аномалии на юге острова наблюдаются с августа 1999 по июнь 2001 г. (рис. 2 а). Зона тревоги в преде-

лах с 45.0° по 48.5° N. Реализацией стал Такойский рой 01.09.2001 ( $\mathbb{N}$ <sup>o</sup> 2), максимальная магнитуда в котором составила M = 5.2, располагается точно в области тревоги.

3. Аномалия в июне 2001 г. на севере острова (рис. 2 а) обнаружена в одной расчетной зоне, принимается ложной тревогой (хотя здесь же в 2005 г. произошло землетрясение с M = 5.1). Основные причины – большой период тревоги



**Рис. 2.** Аномальные зоны (показаны эллипсами) и землетрясения (звездочки) в периоды тревоги: (a) 1999–2001 гг., (b) 2004–2005 гг. Время появления аномалий в областях указано по  $\tau_1$ .

**Figure 2.** The anomalous areas (ellipses) and the earthquakes (asterisks) during the alarm periods: (a) 1999–2001, (b) 2004–2005. The anomalies occurrence time is indicated by  $\tau_1$ .

(больше трех лет, 1361 день), а также появление в этой и соседних зонах аномалий в августе 2004 г. Альтернатива решению о фиксации ложной тревоги – это продление прогноза (что часто практикуется у сейсмологов).

4. Аномальная зона в 2002 и 2003 гг. (рис. 3 а) представляет собой ложную тревогу.

5. Аномалии 2004 г. в 5 южных областях (получены при детализации выборок через 0.1°) являются предвестниками Горнозаводского землетрясения (рис. 2 b).

6. Четыре аномалии августа 2004 г. (рис. 2 b) являются прогнозом одновременно для двух землетрясений 2005 г. в северной части острова. Эти землетрясения (№ 3 и № 4) расположились внутри областей с аномалиями LURR.

7. Аномалия в сентябре 2005 г. фиксировалась в 3 очень близких областях (рис. 2 b). Землетрясения № 5, 6 и 7 могут быть прогнозными целями: отклонение от областей, в которых выделены аномалии, для первого 45 км, второго и третьего – около 15 км. Самый большой период тревоги – для землетрясения № 7 – составляет 741 день.

8. Аномалия фиксировалась в мае 2007 г. всего в 2 областях, очень близких друг к другу (рис. 5 а). Для Невельского землетрясения период тревоги стал самым коротким среди всех случаев – 83 дня.

9. В период с 2007 по 2009 г. аномальные зоны «захватили» практически весь остров (рис. 4 а). Первая зона тревоги включает 3 области на севере острова (52° N). Здесь аномалия впервые отмечена в декабре 2007 г., а через

820 дней в ней произопло Уангское землетрясение. Далее аномалии последовательно появлялись в центральной части Сахалина в ноябре– декабре 2008 г. и на юге от декабря 2008 до июня 2009 г. В отличие от обособленной зоны 2007 г., в 2008–2009 гг. территория, на которой фиксируется период тревоги, очень обширна (с 45.5° по 50.5° Е). В качестве реализаций выступают землетрясения 2010–2011 гг., включая Тымовское, которое находится у верхней границы.

10. Аномалия 2010 г. в единственной зоне может являться предвестником 4 декабрьских землетрясений 2011 г. с периодами ожидания 533 и 560 дней (рис. 5 b), но на этой территории прогноз открыт по аномалии 2008 г., поэтому появление аномалии в 2010 г. не меняет период ожидания. В то же время эта аномальная зона может быть уточняющей для прогноза 2008–2009 гг. по центральной части острова, так как все реализации данного прогноза оказались близки именно к этой области (рис. 4 а).

11. Аномалия 2011 г. в одной области с периодом тревоги 970 дней (2 года 8 мес.) для землетрясения № 16 (рис. 5 b).

12. В 2014 и 2015–2016 гг. выделены два тревожных периода (рис. 4 b), первый из которых представляет собой ложную тревогу, а второй является прогнозом для Онорского (№ 18) и Крильонского (№ 19) землетрясений.

13. На рис. 3 b показана ложная тревога, объединяющая 8 соседних аномалий в конце 2016 г.

Аномалии 2018 г. не рассматриваются в данной работе, так как даже по средним



**Рис. 3.** Аномальные зоны (показаны эллипсами) в периоды тревоги: (a) 2002–2003 гг., (b) 2016 г. Время появления аномалий в областях указано по  $\tau_1$ .

**Figure 3.** The anomalous areas (ellipses) during the alarm periods: (a) 2002–2003, (b) 2016. The anomalies occurrence time is indicated by  $\tau_1$ .

Геосистемы переходных зон 2021, 5 (1): 27 – 45 оценкам тревожный период по ним еще не завершен (по максимальной оценке из табл. 4 – около 3 лет). А если, например, взять времена этих же аномалий, но по последней точке перед возвращением параметра к фону, то самая поздняя аномалия завершается лишь в апреле 2019 г.

В итоге из 15 тревожных периодов (рис. 2–5), которые представлены зонами с аномальными значениями LURR, 11 были завершены землетрясениями, а 4 (25 %) стали ложными тревогами (2001, север; 2002–2003, юг; 2014, север; 2016, север). При этом из 19 землетрясений с  $M \ge 5$  два с магнитудами M = 5в 2012 и 2014 гг. (в северной части острова) не попали в прогнозные области и периоды (пропущенные цели, 11 %).

Учитывая, что ни одно из землетрясений не произошло до того, как значения параметра





Figure 4. The anomalous areas (ellipses) and the earthquakes (asterisks) during the alarm periods: (a) 2008–2009, (b) 2014–2016. The anomalies occurrence time is indicated by  $\tau_1$ .

LURR успевают вернуться к фоновым значениям, можно при расчете периода тревоги брать последнюю точку перед возвращением в фон ( $\tau_2$ ). При этом не только снижается время ожидания (табл. 4, Т2), но и сближаются времена фиксации аномальных областей. Так, по первым точкам аномалии были зафиксированы на юге с августа 1999 по июнь 2001 г. (23 мес.), а по последним – с октября 2000 по июль 2001 (10 мес.). Улучшается ситуация по сближению времен аномалий и в 2009 и 2016 гг. (рис. 4, 6). Например, в центральной и южной части острова по первым точкам аномалии были зафиксированы с октября 2008 по июнь 2009 (9 мес.), а по последним – с апреля по сентябрь 2009 г. (6 мес.).

Для понимания, как могла бы работать методика в реальном времени, можно отыграть пробный ретроспективный сценарий. Итак, с апреля по ноябрь в 2014 г. появляются аномалии на севере (рис. 4), при этом открывается период тревоги до апреля 2017 г. (на 3 года). Далее с июля 2015 по июнь 2016 г. открываются области с юга до центральной части с периодом тревоги до июля 2018 г. Фактически, с июля 2015 по апрель 2017 весь остров находится в зоне тревоги. Можно согласиться, что почти два года тревоги на такой обширной территории это много, однако 14.08.2016 произошло Онорское землетрясение с M = 5.8, которое за 22 года стало третьим по силе из 19 землетрясений в списке. Спустя 7 мес. в данном тревожном периоде произошло Крильонское землетрясение с M = 5. Получается, что в случае прогноза для больших территорий при появлении одного землетрясения тревогу снимать не следует, а стоит продолжить наблюдение.

Для статистической оценки результатов известными методами, такими как, например, диаграмма ошибок [Molchan, 1991] или эффективность по А.А. Гусеву [Гусев, 1974], основной проблемой была и остается неопределенность прогнозного параметра – периода ожидания, который в большинстве случаев небольшой (табл. 4). Однако его увеличение до максимальных значений (землетрясения № 10-14) приводит к тому, что многие периоды пересекаются друг с другом. Заметим, что именно от этого значения (длительность тревоги) зависит количество ложных тревог и пропущенных целей. Даже вопрос широкого диапазона энергетического прогнозного параметра – магнитуды (а она устанавливается от пяти) решается просто, на основе известной информации по потенциалу основных генерирующих зон и законов повторяемости землетрясений.



**Рис. 5.** Аномальные зоны (показаны эллипсами) и землетрясения (звездочки) в периоды тревоги: (a) 2007 г., (b) 2010–2011 гг. Время появления аномалий в областях указано по т<sub>1</sub>.

**Figure 5.** The anomalous areas (ellipses) and the earthquakes (asterisks) during the alarm periods: (a) 2007, (b) 2010–2011. The anomalies occurrence time is indicated by  $\tau_1$ .

Попробуем оценить эффективность прогнозов методом LURR на простейшем для прогнозной тематики уровне – захвата, пропуска цели и ложных тревог. На рис. 7 а показаны землетрясения из табл. 4, причем красным цветом отмечены 17 землетрясений, попавших в области прогноза по пространству и времени, а черным – пропущенные. На карте видно, что в соответствии с табл. 1 области, которые пригодны для расчетов, являются основными зонами генерации сильных землетрясений. Можно разделить их по географическому принципу – северная (51–54° N), центральная (48–51° N) и южная (46–48° N). Северная и центральная зоны имеют между собой разрыв по расчетным областям на 50–51.5° N. Южная зона с центральной зоной пересекаются, так как расчетные области распределены непрерывно.



**Рис. 6.** Аномальные зоны (показаны эллипсами) и землетрясения (звездочки) в периоды тревоги: (a) 2008–2009 гг., (b) 2014–2016 гг. Время появления аномалий в областях указано по  $\tau_2$ .

**Figure 6.** The anomalous areas (ellipses) and the earthquakes (asterisks) during the alarm periods: (a) 2008–2009, (b) 2014–2016. The anomalies occurrence time is indicated by  $\tau_2$ .

Разберем подробно результаты по центральной зоне. Здесь периоды тревоги открываются в среднем каждые 5 лет, т.е. 4 периода тревоги – в 2000 (июль), 2005 (сентябрь), 2009 (март) и в 2016 (январь) году. В отличие от первого случая в 2000 г., когда тревожный период открывался исключительно в одной области центральной зоны, в остальных периоды открывались одновременно и в южной зоне. Землетрясения с М ≥ 5 в центральной зоне происходили в августе 2000 (Углегорское), с 2010 по 2011 (6 землетрясений, включая Тымовское) и в августе 2016 г. (Онорское). В южной части острова в 2006 г. произошло Горнозаводское землетрясение, которое явилось реализацией тревожного периода 2005 г. Все землетрясения произошли в областях, где отмечались аномалии, а периоды тревоги



**Рис. 7.** Землетрясения из табл. 4 (а) и аномальные области 2018–2019 гг. (b). Время появления аномалий в областях указано по  $\tau_2$ .

Figure 7. The earthquakes from the Table 4 (a) and the anomalous areas of 2018–2019 (b). The anomalies occurrence time is indicated by  $\tau_2$ .

Геосистемы переходных зон 2021, 5 (1): 27 – 45 не превышали 3 лет. Можно сказать, стопроцентная реализация. Но это один из лучших примеров, в других зонах имеются и пропущенные цели, и ложные тревоги, поэтому обцая статистика смотрится хуже. Так, по представленным результатам с 1997 по 2019 г., 17 землетрясений из 19 (с  $M \ge 5$ ) оказались в зонах с аномалиями в периоды тревоги не более 3 лет; две цели пропущены. Из 15 периодов тревоги 4 оказались ложными. То есть 75 % тревог дали прогноз для 89 % землетрясений.

Обсуждение результатов завершим картой (рис. 7 b) областей аномальных значений LURR в 2018 и 2019 гг.

Ситуация 2018–2019 гг. близка к схеме, которая реализовывалась в периоды 2009 и 2016 гг., когда многочисленные области с аномалиями появлялись во всех генерирующих зонах острова. Тогда периоды тревоги заканчивались умеренными землетрясениями в 2010, 2011, 2016 и 2017 гг., причем определить, какая зона должна отработать первой, невозможно.

Можно лишь предположить вероятность землетрясения в 2021-2022 гг. в центральной части острова. Это может быть событие на территории Западно-Сахалинской шельфовой зоны (по модели ИМГиГ-2007 Углегорско-Александровская зона), причем, вероятнее всего, в районе от 49 до 50° N, так как выше по широте зона разгружалась в 2011 (Тымовское) и в 2016 (Онорское) годах. Потенциал этой зоны позволяет генерировать землетрясение М ~ 7 с периодичностью 230 лет, однако стоит учесть, что последнее Углегорское землетрясение 2000 г. имело магнитуду близкую к максимальным оценкам (а предыдущее Лесогорско-Углегорское землетрясение с такой же магнитудой было в 1924 г.). Значит, на прогнозный период возможны лишь умеренные магнитуды до 6. На юге в этот период землетрясение вероятно в Южно-Сахалинске или Долинском районе (по модели ИМГиГ-2007 Быковско-Анивская зона). Для этой сейсмогенерирующей зоны возможны землетрясения с магнитудой 7, но с периодом повторяемости порядка 600 лет. Впрочем, современный период наблюдений не имеет примеров генерации там сильных землетрясений (максимальная магнитуда 5.5 у Анивского землетрясения в 1951 г.). Север Сахалина менее предсказуем,

ведь именно там больше всего пропущенных землетрясений и ложных тревог. Однако именно с учетом ложной тревоги в конце 2016 г. здесь также существует вероятность реализации в 2021–2022 гг. прогноза с магнитудой до 6.

Предложенное обоснование метода LURR остается на качественном уровне. Однако полученные результаты для о. Сахалин позволяют считать его эмпирически надежным, особенно в ключе практической реализации двух прогнозов, предложенных в реальном времени (по Онорскому и Крильонскому землетрясениям).

## Заключение

В данной работе на примере о. Сахалин продемонстрирован подход, который может быть использован при прогнозе землетрясений методом LURR в режиме реального времени. Рассмотрены вопросы подготовки каталогов, выбора параметров для расчетов, правил выделения аномалий и определения тревожных периодов. На основе предложенного подхода (алгоритма) проведен анализ землетрясений на о. Сахалин с 1997 по 2019 г., в результате которого 17 землетрясений из 19 (с  $M \ge 5$ ) оказались в зонах с аномалиями в периоды тревоги не более 3 лет. Из 15 таких периодов лишь 4 оказались ложными. Таким образом, 75 % тревог дали прогноз для 89 % землетрясений.

Кроме того, по результатам данной работы на территории о. Сахалин выявлены многочисленные аномалии в 2018–2019 гг., которые указывают на высокую вероятность появления землетрясений умеренных магнитуд (с М ≥ 5) в ближайшие два года. Такая вероятность существует для всех основных зон генерации на Сахалине, так как аномалии зафиксированы в большинстве расчетных областей. Это третий по счету случай (после 2008–2009 и 2015–2016 гг.), когда точные прогнозы по месту будущего события, а также их количеству невозможны ввиду одновременного появления аномалий в нескольких сейсмогенерирующих зонах.

Методика и результаты данной работы могут служить практическими рекомендациями для работы с методом LURR специалистам сейсмологам о. Сахалин и, возможно, других сейсмоопасных регионов.

## Список литературы

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

2. Закупин А.С. **2016.** Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса. *Геоинформатика*, 1: 34–43.

3. Закупин А.С., Богинская Н.В. **2020.** Среднесрочные оценки сейсмической опасности на о. Сахалин методом LURR: новые результаты. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 160–177. 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., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. **2018.** Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Онорского землетрясения на Сахалине (Мw = 5.8, 14 августа 2016 года). *Геология и геофизика*, 11: 1904–1911. https://doi.org/10.15372/gig20181112

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

7. Левин Б.В., Ким Ч.У., Соловьев В.Н. Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин. *Тихоокеанская геология*, 2012, 31(5): 93–103.

8. Поплавская Л.Н. (ред.). **2006.** *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.* Авторы: 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.

9. Раутиан Т.Г. **1960а.** Затухание сейсмических волн и энергия землетрясений. *Труды Таджикского* института сейсмостойкого строительства и сейсмологии, 7: 41–86.

10. Раутиан Т.Г. 1960б. Энергия землетрясений. Труды ИФЗ АН СССР, 176(9): 75-114.

11. Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. **1967.** Соотношение между энергетическим классом и магнитудой курильских землетрясений. *Физика Земли*, 2: 13–23.

12. Сохатюк А.С., Децик И.В., Богинская Н.В., Паршина И.А., Ферчева В.Н. **2016.** Сахалин (M ≥ 2.8). Землетрясения России в 2014 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 127–131.

13. Gardner J.K., Knopoff L. **1974.** Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bull. of the Seismological Society of America*, 64(5): 1363–1367.

14. Grünthal G., Wahlström R., Stromeyer D. **2009.** The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern Europe (CENEC) – updated and expanded to the last millennium. *J. of Seismology*, 13(4): 517–541. https://doi.org/10.1007/s10950-008-9144-9

15. Molchan G. 1991. Structure of optimal strategies in earthquake prediction. Tectonophysics, 193: 267–276.

16. Reasenberg P. **1985.** Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982. *J. of Geophysical Research*, 90(3–18): 5479–5495.

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

18. Uhrhammer R. **1986.** Characteristics of Northern and Central California seismicity. *Earthquake Notes*, 57(1): 21.

19. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. **2001.** Development of a new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 157(11/12): 2365–2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7\_29

20. Yin X.C., Zhang L.P., Zhang H.H., Yin C., Wang Y., Zhang Y., Peng K., Wang H., Song Z., Yu H., Zhuang J. **2006.** LURR's twenty years and its perspective. *Pure and Applied Geophysics*, 163: 2317–2341. https://doi.org/10.1007/s00024-006-0135-x

## References

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

2. Zakupin A.S. **2016.** Program complex for the analysis of instability of seismic process. *Geoinformatika*, 1: 34–43. (In Russ.).

3. Zakupin A.S., Boginskaya N.V. **2020.** Mid-term assessments of the seismic hazard on Sakhalin Island by the LURR method: new results. *Geosistemy perekhodnykh 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

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

5. 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

6. Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. **2020.** Using the Load/Unload Response Ratio and Self-Developing Processes Methods of analyzing seismic sequences to predict earthquakes in Sakhalin. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 56(7): 693–705. https://doi.org/10.1134/S0001433820070105

7. Levin B.W., Kim C.U., Solovjev V.N. **2013.** A seismic hazard assessment and the results of detailed seismic zoning for urban territories of Sakhalin Island. *Russian J. of Pacific Geology*, 7(6): 455–464.

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

9. Rautian T.G. **1960a.** Zatukhaniye seysmicheskikh voln i energiya zemletryaseniy [Seismic waves attenuation and earthquakes energy]. *Trudy Tadzhikskogo instituta seysmostoykogo stroitel'stva i seysmologii* [*Proceedings of the Tajik Institute of Earthquake Engineering and Seismology*], 7: 41–86.

10. Rautian T.G. **1960b.** [The energy of earthquakes]. *Trudy IFZ AN SSSR* [*Proceedings of the IPE, the USSR Academy of Sciences*], 176: 75–114. (In Russ.).

11. Solov'yev S.L., Solov'yeva O.N. **1967.** [The relationship between the energy class and magnitude of Kuril earthquakes]. *Izvestiya RAN, Fizika Zemli*, 2: 13–23.

12. Sokhatyuk A.S., Detsik I.V., Boginskaya N.V., Parshina I.A., Fercheva V.N. **2016.** Sakhalin ( $M \ge 2.8$ ). *Zemletryaseniya Rossii v 2014 g. [Earthquakes in Russia in 2014]*. Obninsk: FITs EGS RAN, 127–131.

13. Gardner J.K., Knopoff L. **1974.** Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bull. of the Seismological Society of America*, 64(5): 1363–1367.

14. Grünthal G., Wahlström R., Stromeyer D. **2009.** The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern Europe (CENEC) – updated and expanded to the last millennium. *J. of Seismology*, 13(4): 517–541. https://doi.org/10.1007/s10950-008-9144-9

15. Molchan G. 1991. Structure of optimal strategies in earthquake prediction. Tectonophysics, 193: 267–276.

16. Reasenberg P. **1985.** Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982. J. of Geophysical Research, 90(3–18): 5479–5495.

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

18. Uhrhammer R. **1986.** Characteristics of Northern and Central California seismicity. *Earthquake Notes*, 57(1): 21.

19. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. **2001.** Development of a new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 157(11/12): 2365–2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7\_29

20. Yin X.C., Zhang L.P., Zhang H.H., Yin C., Wang Y., Zhang Y., Peng K., Wang H., Song Z., Yu H., Zhuang J. **2006.** LURR's twenty years and its perspective. *Pure and Applied Geophysics*, 163: 2317–2341. https://doi.org/10.1007/s00024-006-0135-x

## Об авторах

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

БОГИНСКАЯ Наталья Владимировна (ORCID 0000-0002-3126-5138), научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, fily77@mail.ru

#### **About the Authors**

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

BOGINSKAYA Nataliya V. (ORCID 0000-0002-3126-5138), Researcher of the Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, fily77@mail.ru Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

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

УДК 550.374:621.314.632:621.382.2/.3

#### https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.046-054

# Геофизический генератор импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр

© 2021 И. П. Дудченко\*, Д. В. Костылев, С. А. Гуляков, Н. С. Стовбун

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия \*E-mail: ilpadu@mail.ru

**Резюме.** В статье описываются процесс и результат разработки, а также испытаний экономически эффективного, переносного, безопасного для перевозки авиатранспортом геофизического генератора импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр. Базовым элементом генератора являются быстродействующие силовые электронные ключи нового поколения – биполярный транзистор с изолированным затвором или полевой транзистор на основе карбида кремния и компактный силовой преобразователь переменного напряжения автономного генератора или электрической сети в постоянное напряжение, использующий широтно-импульсную модуляцию и стабилизацию тока или напряжения в зависимости от режима, заданного исследователем. Пригодность разработанной конструкции генератора и правильность выбора параметров его элементов подтвердились в ходе испытаний в полевых условиях, где был проведен детальный анализ воздействия геофизического генератора на параметры геосреды.

**Ключевые слова:** сейсморазведка, электроразведка, геофизические исследования, биполярный транзистор с изолированным затвором, полевой транзистор на основе карбида кремния, силовой преобразователь, выпрямитель, сейсмический шум, электромагнитное зондирование

## A geophysical pulse voltage generator for seismic and electric exploration of the subsurface

Ilia P. Dudchenko\*, Dmitry V. Kostylev, Sergey A. Gulyakov, Nikolay S. Stovbun

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

**Abstract.** This article describes the process and results of the development and testing of a cost-effective, portable, safe to move by air geophysical pulse voltage generator for seismic exploration of the subsurface. The generator is based on high-speed power electronic keys of a new generation consisting of an insulated gate bipolar transistor or a field-effect transistor based on silicon carbide, a compact power converter of alternating voltage from an autonomous generator or electric network to direct voltage using pulse-width modulation and current or voltage stabilization depending on the mode set by a researcher. Field tests were conducted to confirm the suitability of the developed design of the generator and the correctness of the chosen parameters of its elements. To this end, a detailed analysis of the effect of the developed geophysical generator on the parameters of the geoenvironment was carried out.

**Keywords:** seismic exploration, electric exploration, geophysical research, insulated gate bipolar transistor, silicon carbide field-effect transistor, power converter, rectifier, seismic noise, electromagnetic sounding

Для цитирования: Дудченко И.П., Костылев Д.В., Гуляков С.А., Стовбун Н.С. Геофизический генератор импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр. *Геосистемы переходных зон*, 2021, 5(1), с. 46–54.

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.046-054

*For citation:* Dudchenko I.P., Kostylev D.V., Gulyakov S.A., Stovbun N.S. A geophysical pulse voltage generator for seismic and electric exploration of the subsurface. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, 5(1), pp. 46–54. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.046-054

## Введение

Одна из ключевых проблем инструментального обеспечения геофизических исследований – высокая стоимость оборудования. Но благодаря успехам современной силовой электронной техники, появлению новых компонентов, а также расширению технических возможностей разработчиков, в настоящее время появилась возможность создавать недорогие и эффективные устройства, ориентированные на узкоспециализированные исследовательские задачи, при минимальных затратах.

## Постановка задачи и определение основных элементов

Для осуществления сейсмоэлектрической разведки недр [Якубовский, Ренард, 1991] требуется источник электрического воздействия на пару разнесенных друг от друга заземлителей. Основным элементом источника служит электронный ключ, в заданное время включающий и отключающий электрическое воздействие (напряжение или ток).

В Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) более 30 лет назад был разработан и использовался источник высоковольтного (10 кВ) импульсного воздействия, который разряжал батарею высоковольтных конденсаторов с помощью так называемого игнитрона – электронной лампы, заполненной ртутью и ее парами. В настоящее время восстановление и модернизация данной установки не только нецелесообразны из-за невозможности приобрести игнитроны, но и полностью исключены из-за ограничений на использование приборов, содержащих ртуть или ее соединения.

Учитывая прогресс в части роста напряжений и токов полууправляемых полупроводниковых ключей [Воронин, 2001] – тиристоров, а также наличие большой номенклатуры их на рынке, первоначально рассматривался вопрос о применении тиристоров в качестве базового элемента. Однако тиристор подобен игнитрону в том отношении, что позволяет только включить воздействие, но не отключить его (именно поэтому тиристор и ему подобные элементы называют «полууправляемый» ключ). Следовательно, воздействие должно самопроизвольно «закончиться», что накладывает ограничения на параметры и форму электрических импульсов, которые может выдавать источник, а также на время воздействия этих импульсов.

Поэтому было принято решение использовать в качестве базового элемента один из полностью управляемых силовых ключей, которые в электронике называют транзисторами.

«Классический» биполярный транзистор управляется током, достигающим нескольких процентов от коммутируемого тока, что является значительной величиной и в результате усложняет систему гальванической изоляции цепей управления от силовой цепи, а в конечном счете делает устройство малоэффективным в плане энергопотребления, при том что снижение эффективности (КПД) означает рост тепловых потерь, требование больших площадей охлаждения и, как следствие, рост массы и габаритов устройства.

Поэтому выбор был сделан в пользу двух типов управляемых силовых ключей: полевых транзисторов – КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник - MOSFET, metal oxide semiconductor field effect transistor) на базе карбида кремния (SiC MOSFET), имеющих малое сопротивление силового канала, или практически эквивалентных им по параметрам управления, но более быстродействующих (время полного отключения тока из включенного состояния менее 200 нс) биполярных транзисторов с изолированным затвором – БТИЗ (IGBT, insulated gate bipolar transistor). Устройство разработано с условием совместимости с обоими типами транзисторов, но при выборе конкретного ключа для практического применения было решено использовать более дешевый ІGBT-транзистор, позволяющий управлять током лишь одного направления, что допустимо в запланированном эксперименте. Имеющиеся в продаже IGBTтранзисторы выпускаются на большой диапазон напряжений (до 5 кВ) и токов (до 600 А). В отличие от SiC MOSFET, силовой канал IGBT-транзистора однонаправленный, что позволяет управлять током одной полярности, как было указано в техническом задании. При необходимости управления током обеих полярностей IGBT-транзистор можно заменить на полевой транзистор типа SiC MOSFET.

## Разработка генератора импульсных напряжений

Первоначальная отладка разработанных узлов генератора. Для первоначальной отладки работы узлов по отдельности был использован универсальный комплект PinBoard II (рис. 1) производства EasyElectronics (Россия) (http://easyelectronics.ru/otladochnaya-platapinboard-ii.html; [Соловьев, Морозов, 2014]). Это позволило ускорить разработку, так как данный комплект ориентирован на потребности разработчика и не только содержит в своем составе базовый набор инструментов в виде распаянных на плате электронных компонентов, но и предоставляет возможность подключать дополнительные модули (называемые «боковыми»), а также способен выполнять функции программатора. В отличие от выпускаемых фирменных отладочных комплектов



**Рис. 1.** Синтез узлов генератора с помощью отладочной платы PinBoard II (Россия). **Figure 1.** Synthesis of generator nodes using the PinBoard II debugging board (Russia).



**Рис. 2.** Источник постоянного напряжения 360 В 1500 Вт и прерыватель тока. **Figure 2.** DC 360 V 1500 W power supply and current interrupter.

мировых лидеров-производителей электронных компонентов, PinBoard II не привязан к какой-либо одной платформе и легко трансформируется под широкий круг задач.

В отличие от переменного тока, сильно подверженного поверхностному эффекту и поэтому текущему в поверхностном слое грунта, постоянный ток течет по всей толще грунта, в результате чего образуется объемное поле плотности тока, создающее значительный распределенный магнитный поток. При разрыве цепи в таких условиях возможно возникновение значительной электродвижу-

щей силы (ЭДС) самоиндукции. На практике эта ЭДС проявлялась в форме устойчивой электрической дуги при попытках разорвать цепь неавтоматическими устройствами с подвижными контактами, что подтвердило необходимость учета данного эффекта при проектировании прерывателя тока. Стандартным методом защиты силовых электронных ключей от перенапряжений при отключении цепи является применение встречно-параллельного «обратного» диода. Так как IGBT-транзисторы широко применяются для быстрой коммутации цепей со значительной индуктивностью, например в системах электропривода или сварочных преобразователях, то в подавляющем большинстве они выпускаются со встроенными обратными диодами, чем достигается безотказная работа этих ключей даже на «ультразвуковых» частотах переключения.

В результате испытаний и отладки на PinBoard II был создан прерыватель тока (рис. 2, справа) на базе IGBT-транзистора, управляемого микроконтроллером AtTiny13 (Smart Connected Secure Microchip Technology. – https://www.microchip. com/). Изначально параметры заземляющих устройств в местах проведения будущих экспериментов были неизвестны, поэтому проектирование прерывателя было произведено «с запасом» (600 В, 90 А), который впоследствии был скорректирован в меньшую сторону – до 600 В, 30А (IGBT-транзистор NGTG15N60S1EG) (ДКО Электронщик. – https://www.electronshik. ru/, дата обращения: 06.11.2020).

Первые эксперименты и уточнение параметров. В первых экспериментах, начатых в 2019 г. на Камчатке и в Москве, в качестве источника были использованы батареи из 25 последовательно соединенных свинцово-кислотных аккумуляторов, которые обеспечили постоянное напряжение около 300 В. Были выявлены существенные недостатки такого решения. Во-первых, существенная масса и невозможность авиаперевозки из-за наличия в составе аккумуляторов серной кислоты, в результате чего приобретаемые для эксперимента аккумуляторы приходилось оставлять на месте эксперимента. Во-вторых, для зарядки аккумуляторов после рабочего дня требуется или иметь 25 зарядных устройств, или потратить несколько дней на зарядку всех аккумуляторов до следующего дня проведения эксперимента. В-третьих, по мере разряда батарей их ЭДС уменьшается, а внутреннее сопротивление увеличивается, что приводит к изменению параметров импульса в ходе эксперимента.

Поэтому летом 2020 г. прерыватель тока был дополнен источником стабилизированного постоянного напряжения 360 В с номинальным током 4.2 А, что соответствует мощности 1500 Вт. Основой модуля служит микросхема PF1000А-360 фирмы TDK-Lambda Americas (PF-1000A: Detailedinformation: Industrial/medicalpowersupplies|TDK-Lambhttps://product.tdk.com/en/ daAmericas. search/power/switching-power/ac-dc-converter/ info?part no=PF1000А-360, дата обращения: 25.11.20) размерами 146 × 86 × 13 мм, представляющая собой широтно-импульсно модулирующий (ШИМ) преобразователь со стабилизацией напряжения при питании переменным напряжением от 85 до 265 В частотой 47-63 Гц. Была изготовлена печатная плата, на которую установили PF1000А-360 со вспомогательными элементами. Плату встроили в корпус типа mini-ITX (рис. 2, слева), в который также поместили дополнительный источник питания 12 В, амперметр и принудительное охлаждение.

При испытании в пос. Петропавловское Анивского района в октябре 2020 г. был сделан заземлитель из оцинкованных труб. Грунт в районе испытаний был сильно увлажнен, и поэтому предполагалось, что ток заземлителей будет иметь значительную величину, максимально возможную для данной конструкции заземлителя. Во время полевых испытаний было зафиксировано превышение тока заземлителя над номинальным током источника на 33 %. Благодаря активному охлаждению источник исправно отработал в повторно-кратковременном режиме (5 с – импульс тока, 15 с – пауза, а также 10 с – импульс, 20 с – пауза) сериями по 100 импульсов, при этом температурный режим источника остался в пределах номинального режима.

## Оценка воздействия работы генератора на геофизические параметры

Испытания 29 октября 2020 г. в пос. Петропавловское Анивского района проводились на комплексном геофизическом полигоне ИМГиГ ДВО РАН, оснащенном аппаратурой регистрации сейсмического и сейсмоакустического шума (молекулярно-электронный широкополосный сейсмометр СМЕ-6111 и молекулярно-электронный гидрофон [Kostylev et al., 2019; Костылев, 2020]) и многоэлектродной системой геоэлектрических измерений [Lyubushin et al., 2016]. Общая схема оснащения полигона приведена на рис. 3.

Расположение электродов генератора относительно оборудования геофизического полигона и автомобильной дороги Южно-Сахалинск – Холмск, с указанием реперной точки с координатами, приведено на рис. 4.

Воздействие работы генератора на геофизические параметры оценивали прежде всего по записям сейсмического шума молекулярно-электронных приборов, а также по результатам анализа измерений многоэлектродной системы. Многоэлектродная система геоэлектрических измерений представляет собой вертикальную систему из 4 горизонтально расположенных компактных электродов, закопанных на небольшой глубине в грунт. Пункт подземно-электрических измерений имеет 3 измерительных шурфа, расположенных под углом 45° к магнитному меридиану: северовосточный (СВ), центральный (Ц) и юго-западный (ЮЗ). Шурфы располагаются на расстоянии 5 м друг от друга. Каждый шурф имеет



**Рис. 3.** Оснащение комплексного геофизического полигона «Петропавловское». **Figure 3.** Equipment of the complex geophysical polygon "Petropavlovsk".



**Рис. 4.** Карта места проведения эксперимента 29 октября 2020 г. **Figure 4.** Map of the site of the experiment on October 29, 2020.

глубину 3 м. Измеряемой величиной является разность потенциалов между электродами в каждом шурфе (электрод-электродная схема), между электродами в различных шурфах (субгоризонтальная схема), между каждым электродом и локальным заземлением (схема с общей землей). Использование данной аппаратуры при проведении эксперимента 29 октября 2020 г. позволило наглядно представить процесс проведения эксперимента и определить периоды воздействия импульсов тока на регистрацию сейсмического шума молекулярно-электронными измерительными приборами пункта наблюдений (рис. 5). Результаты, представленные на рис. 5, показывают, что фактически каждому этапу эксперимента соответствует в записях молекулярно-электронных приборов отклик в уровне регистрируемого сейсмического шума на результат воздействия генерации импульсов напряжения и возбуждения тока во внешнем слое земной коры. Кроме того, был проведен анализ четырех периодов продолжительностью по 24 ч – двое суток до начала эксперимента, сутки в день проведения эксперимента и сутки в день, следующий за днем проведения эксперимента. Результаты анализа представлены на рис. 6. В процессе анализа для записей сейсмического шума сейсмометром СМЕ-6111 были построены огибающие сигнала сейсмического шума, очищенные от откликов записей прибора на сейсмические воздействия. Рисунок наглядно показывает для дней, предшествующих эксперименту (27–28 октября), явно выраженный суточный характер изменения уровня сейсмического шума – значительное уменьшение его уровня в ночные периоды (по сахалинскому времени) и увеличение во время дневной активности. Совершенно иной характер отмечается 29 октября (время начала записи шума 29 октября на рисунке соответствует времени начала эксперимента). Традиционного ночного затишья в уровне шума 29 октября не наблюдается – напротив, отмечается сигнал акселерационного типа (плавное нарастание колебаний). Указанная тенденция сохраняется в течение 22–23 ч после окончания эксперимента. Следующие сутки после проведения эксперимента (30 октября) характеризуются сигналом релаксационного типа, и уровень сейсмического шума возвращается к обычным



**Рис. 5.** Огибающая сигналов сейсмического шума молекулярно-электронных приборов (вверху) и изменение разности потенциалов на каналах измерений между электродами северо-восточного (CB) шурфа системы геоэлектрических измерений (внизу) в период проведения эксперимента (время UTC). Этапы проведения эксперимента: (A) – проверка оборудования; (Б) – первая серия импульсов. Полярность: электрод 1 (–), электрод 2 (+). Импульс 5 с, пауза 15 с. Количество импульсов – 100. Значение тока – 5.2 А в начале серии, 4.95 А – в конце; (B) – окончание первой серии импульсов; (Γ) – планируемое начало второй серии импульсов (первый тест). Полярность: электрод 1 (+), электрод 2 (–). Импульс не более 1 с (выход из строя входного предохранителя); (Д) – планируемое начало второй серии импульсов (второй тест). Полярность: электрод 1 (+), электрод 2 (–). Импульс не более 5 с (перегрузка генератора 2 кВт); (Е) – вторая серия импульсов. Полярность: электрод 1 (–), электрод 2 (+). Импульс 10 с, пауза 20 с. Количество импульсов – 100. Значение тока – от 5.2 до 5.4 А; (Ж) – окончание второй серии импульсов.

**Figure 5.** The envelope of the seismic noise signals of molecular electronic devices (top) and the change in the potential difference on the measurement channels between the electrodes of the north-eastern (NE) pit of the geoelectric measurement system (bottom) during the experiment (UTC time). The stages of the experiment: (A) – equipment checking; (B) – first pulse train. Polarity: electrode 1 (–), electrode 2 (+). Pulse – 5 s, pause – 15 s. Number of pulses is 100. Current meaning is 5.2 A at the train beginning, and 4.95 A – at the end; (B) – the end of first pulse train; ( $\Gamma$ ) – planned start of second pulse train (first test). Polarity: electrode 1 (+), electrode 2 (–). Pulse is not more than 1 s (failure of the input fuse); ( $\mathcal{I}$ ) – planned start of second pulse train (second test). Polarity: electrode 1 (+), electrode 2 (–). Pulse is not more than 5 s (the generator overload 2 kW); (E) – second pulse train. Polarity: electrode 1 (–), electrode 2 (+). Pulse – 10 s, pause – 20 s. Number of pulses is 100. Current meaning is from 5.2 A to 5.4 A; ( $\mathcal{K}$ ) – end of second pulse train.



Рис. 6. Сейсмический шум, зарегистрированный молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111 до и после проведения эксперимента.

Figure 6. Seismic noise recorded by the molecular-electronic seismometer CME-6111 before and after the experiment.

значениям приблизительно через 42 ч после окончания эксперимента. Подобные результаты не противоречат данным, полученным в работе [Закупин и др., 2014], где отмечалось, что амплитуда сигналов после электромагнитного воздействия на геосреду превышала среднеквадратичный уровень шума более чем в 3 раза.

#### Окончательный вариант генератора

С учетом вышеописанных результатов были уточнены требования к генератору, усовершенствован алгоритм его работы, разработано и изготовлено новое устройство прерывателя тока, показанное на рис. 7.

В качестве источника постоянного напряжения был выбран модуль выпрямителя CSP-3000-400. Модуль поддерживает как режим стабилизации напряжения в диапазоне от 60 до 400 В, так и режим стабилизации тока в диапазоне от 0.6 до 7.5 А. Постоянное стабилизированное напряжение от 60 до 400 В с внешним управлением либо путем изменения напряжения на управляющем входе, либо с помощью ШИМ-сигнала частотой 500-1000 Гц. Испытания прерывателя с модулем выпрямителя CSP-3000-400 в условиях лаборатории ИМГиГ ДВО РАН в ноябре 2020 г. подтвердили правильность выбора устройства. Дальнейшие полевые испытания окончательного варианта устройства были временно прекращены в связи с наступлением зимы.

Структурная схема геофизического генератора импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр приведена на рис. 8. На схеме серыми границами выделены части генератора, гальванически изолированные друг от друга. Управляющим устройством генератора служит микроконтроллер AtMega8 (Smart Connected Secure Microchip Technology. – https://www.microchip.com/, дата обращения: 20.11.2020), ресурсов которого хватает для выполнения функции микропро-



**Рис. 7.** Усовершенствованный прерыватель тока. **Figure 7.** Advanced current interrupter.



Рис. 8. Структурная схема геофизического генератора импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр.

**Figure 8.** Block diagram of the geophysical pulse voltage generator for seismic and electric exploration of the subsurface.

цессорной системы управления прерывателем тока (автоматическая отработка эксперимента по заданным параметрам, работа с клавиатурой, жидкокристаллическим индикатором и SD-картой). Справа сверху на рис. 8 изображена питающая сеть 230 В, которая относится к классу 0.4 кВ с глухо заземленной нейтралью, а поэтому должна быть гальванически изолирована от выходной цепи источника постоянного напряжения. Для управления прерывателем тока со стороны микроконтроллера имеется оптоэлектронное устройство гальванической развязки, встроенное в модуль самого прерывателя. Для питания низковольтной части прерывателя тока и оптоэлектронного устройства гальванической развязки применен встроенный вспомогательный источник, входящий в состав CSP-3000.

Разработанный генератор можно перевозить любым транспортом. Масса всех элементов генератора без учета элементов заземлителя и питающей линии составляет не более 5 кг. Диапазон напряжений питания – 180–264 В переменного напряжения частотой 47–63 Гц либо 254–370 В постоянного напряжения. Потребляемый из сети ток равен 16 А при напряжении сети переменного тока 230 В. Применение быстродействующего IGBT-ключа

в модуле прерывателя тока создает возможность совершенствовать генератор без изменения его схемы, в том числе – генерировать импульсы напряжения не только заданной длительности, но и заданной формы. Стоимость модулей и комплектующих, на которых собран генератор, укладывается в бюджетную схему, а все работы по его сборке и наладке были произведены силами отдела исследований геофизических полей и физических свойств геоматериалов с использованием инструментов и оборудования Центра коллективного пользования «Комплексные исследования природных и техногенных систем» ИМГиГ ДВО РАН.

#### Выводы

1. Проведено исследование пригодности мощных электронных

ключей для генерации импульсов напряжения и возбуждения тока во внешнем слое земной коры.

2. Учтены фактические зависимости величины постоянного тока заземлителя от приложенного напряжения и заглубления заземлителя.

3. Спроектирован и собран силами ИМГиГ ДВО РАН геофизический генератор импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр.

4. Применение быстродействующих силовых электронных ключей в качестве базового элемента генератора делает возможной генерацию импульсов заранее заданной произвольной формы с помощью широтно-импульсной модуляции.

5. Стоимость компонентов и простота конструкции генератора позволяют легко воспроизводить его в любой исследовательской или иной заинтересованной организации при условии передачи программного обеспечения аппаратного уровня устройства.

6. Апробация прибора в условиях полевого эксперимента показала очевидное влияние воздействия прибора на геосреду, что было подтверждено анализом результатов записей сейсмического и сейсмоакустического шума на комплексном геофизическом полигоне ИМГиГ ДВО РАН.

## Список литературы

1. Воронин П.А. 2001. Силовые полупроводниковые ключи. Семейства, характеристики, применение. М.: Додэка-XXI, 384 с.

2. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Мубассарова В.А., Ильичев П.В. 2014. Сейсмоакустические проявления воздействий мощных импульсов тока по данным скважинных измерений на Бишкекском геодинамическом полигоне. Физика Земли, (5): 105-120.

3. Костылев Д.В., Богинская Н.В. 2020. Сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов на Сахалине и южных Курильских островах (о. Кунашир). Геосистемы переходных зон, 4(4): 486-499. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.486-499.

4. Соловьев Р.И., Морозов А.С. 2014. Обзор отладочного комплекса PINBOARD 2 и его практическое применение для разработки устройств на микроконтроллерах Atmel и ARM. В кн.: Современная наука глазами молодых ученых: достижения, проблемы, перспективы: материалы межвузовской науч-практ. конф. Рязань: Рязанский гос. агротехн. ун-т им. П.А. Костычева, с. 98–101.

5. Якубовский Ю.В., Ренард И.В. 1991. Электроразведка. М.: Недра, 359 с.

6. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., Boginskava N.V. 2019. About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 324(012009). https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012009

7. Lyubushin A.A., Bobrovskiy V.S., Shopin S.A. 2016. Experience of complexation of global geophysical observations. Geodynamics & Tectonophysics, 7(1): 191-195.

## References

1. Voronin P.A. 2001. [Power semiconductor keys. Families, characteristics, and applications]. Moscow: Dodeka-XXI, 384 p. (In Russ.).

2. Zakupin A.S., Mubassarova V.A., Il'ichev P.V., Bogomolov L.M. 2014. Seismoacoustic responses to highpower electric pulses from well logging data at the Bishkek geodynamical test area. Izvestiva. Physics of the Solid Earth, 50(5): 692–706. https://doi.org/10.1134/s1069351314040193

3. Kostylev D.V., Boginskaya N.V. 2020. Seismoacoustic observations using molecular-electronic hydrophones on Sakhalin and the South Kuril Islands (Kunashir Island). Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones, 4(4): 486-499. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.486-499

4. Solovyov R.I., Morozov A.S. 2014. Overview of the PINBOARD 2 debugging complex and its practical application for developing devices on Atmel and ARM microcontrollers. In: Modern science through the eyes of young scientists: achievements, problems, prospects: Materials of the Interuniversity scientific and practical conf. Ryazan: Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, p. 98-101. (In Russ.).

5. Yakubovskiy Yu.V., Renard I.V. 1991. [Electrical exploration]. Moscow: Nedra, 359 p. (In Russ.).

6. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. 2019. About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 324(012009). https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012009

7. Lyubushin A.A., Bobrovskiy V.S., Shopin S.A. 2016. Experience of complexation of global geophysical observations. Geodynamics & Tectonophysics, 7(1): 191-195.

### Об авторах

ДУДЧЕНКО Илья Павлович (ORCID 0000-0002-4967-7405), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, руководитель отдела исследования геофизических полей и физических свойств геоматериалов ЦКП «Комплексные исследования природных и техногенных систем», Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, ilpadu@mail.ru

КОСТЫЛЕВ Дмитрий Викторович (ORCID 0000-0002-8150-9575), младший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, d.kostylev@imgg.ru

ГУЛЯКОВ Сергей Александрович, инженер-исследователь ЦКП «Комплексные исследования природных и техногенных систем», Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, gulyakov 97@mail.ru

СТОВБУН Николай Сергеевич, инженер-исследователь ЦКП «Комплексные исследования природных и техногенных систем», Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, nikolay19972016@gmail.com

#### **About the Authors**

DUDCHENKO Ilia Pavlovich (ORCID 0000-0002-4967-7405), Cand. of Engineering, Senior Researcher at the Center for Collective Use, Head of the Department of research of geophysical fields and physical properties of geomaterials, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, ilpadu@mail.ru

KOSTYLEV Dmitry Viktorovich (ORCID 0000-0002-8150-9575). Junior Researcher at the Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, d.kostylev@imgg.ru

GULYAKOV Sergey Aleksandrovich, Research Engineer at the Center for Collective Use, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, gulyakov 97@mail.ru

STOVBUN Nikolay Sergeevich, Research Engineer at the Center for Collective Use, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk,

nikolay19972016@gmail.com

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)

## ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

Публикуя мнение д-ра физ.-мат. наук Ю.Л. Ребецкого о некоторых аспектах статьи «О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии»\*, а также отзыв на данное письмо в редакцию д-ра физ.-мат. наук М.В. Родкина, редакция приглашает читателей к дальнейшему обсуждению рассматриваемых вопросов на страницах нашего журнала.

УДК 550.34.094

Publishing this Letter by Doctor of Physics and Mathematics Yuryi L. Rebetsky *On some aspects of the article "On the stress drop in North Eurasia earthquakes sourcesites versus specific seismic energy"*, as well a response by Doctor of Physics and Mathematics Michael V. Rodkin to this letter, the editorial board invites readers to further discuss the problems under consideration on the pages of our Journal.

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.055-059

## О некоторых аспектах статьи «О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии»

© 2021 Ю. Л. Ребецкий

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия E-mail: reb@ifz.ru

В статье Н.А. Сычевой и Л.М. Богомолова предложено объединить взаимосвязанные данные по сброшенным напряжениям в очагах землетрясений,  $\Delta \sigma$ , и приведенной сейсмической энергии,  $e_{\rm pR}$ , для анализа зависимости этих параметров от масштаба землетрясения с расширением статистики измерений (оценок). На примере Северного Тянь-Шаня (Бишкекский полигон с сетью KNET) установлена зависимость этих параметров очага от сейсмического момента или от магнитуды землетрясения в диапазоне магнитуд  $2.2 \leq M \leq 4.0$ . Автор письма в редакцию отмечает, что выводы статьи имеют ограничения: такая взаимосвязь проявляется только в более или менее узком интервале магнитуд. Обращено также внимание на смысловое различие параметров  $\Delta \sigma$  и  $e_{\rm pR}$ . Именно приведенная сейсмическая энергия отражает среднюю деформацию в зоне очага, и ее использование для анализа масштабных зависимостей очагов землетрясений более информативно.

Заключение статьи Н.А. Сычевой и Л.М. Богомолова начинается с фразы: «Для анализа весьма запутанного вопроса о наличии или отсутствии корреляций между сбросом напряжений в очагах землетрясений Северной Евразии и их энергетической характеристикой...».

В статье вопросу взаимосвязи напряжений,  $\Delta \sigma$ , сброшенных в очаге землетрясения, и скалярного сейсмического момента,  $M_0$ , посвящено основное внимание. Аргументировано (формула (20) из статьи), что взаимосвязь между  $M_0$  и приведенной сейсмической энергией  $e_{\rm PR} = E_{\rm s}/M_0$  описывается регрессией, по форме пропорциональной  $\Delta \sigma$  ( $M_0$ ).

Что в этой связи хотелось бы отметить? Прежде всего то, что приведенная сейсмическая энергия и скалярный сейсмический момент определяются из разного типа исходных сейсмических данных, а характеристики очага землетрясения: сброшенные напряжения и сейсмический момент – имеют разную размерность ( $\Delta \sigma$  [Па], а  $M_0$  [Н м]).

Сейсмический момент определяется по низкочастотной составляющей спектра *S*-волны и не зависит от динамики развития разрыва, в то время как энергия землетрясений характеризует высокочастотную составляющую сейсмических волн. Именно это обстоятельство дает возможность рассматривать их как два независимых параметра очага землетрясения. Следствием этого является независимость размера очага и сброшенных напряжений. Детальные сейсмологические исследования показывают существование подобия сейсмического

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

Sycheva N.A., Bogomolov L.M. On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 5(1), p. 393–446. (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446

процесса только в некотором диапазоне магнитуд [Скоркина, 2017]<sup>1</sup>. Следует отметить, что проблеме скейлинга (масштабная инвариантность) много внимания уделялось в работах А.А. Гусева [Гусев, 1984; Гусев, Гусева, 2014]<sup>2</sup>.

Кроме отмеченного выше главного фактора существует еще ряд причин, влияющих на рассматриваемую проблему, способных осложнить получение корректного решения указанной проблемы. Так, только в последние десятилетия появилось достаточное число широкополосных сейсмических станций, удовлетворяющих этим требованиям.

Если напряжения характеризуют силу, деленную на площадь, то сейсмический момент по своему определению ( $M_0 = G \cdot S \cdot D = G \cdot V \cdot \varepsilon$ , что эквивалентно формуле (7) в статье) пропорционален средней упругой деформации є, снимаемой в процессе реализации сейсмического смещения на разрыве - землетрясения. Здесь, как и в статье: G – модуль сдвига, *D* – амплитуда смещения в очаге, *S* – площадь поверхности разрыва. Объем очага  $V = S \cdot L$ (L – характерный размер очага), а средняя деформация  $\varepsilon = D/L$ . Параметры  $\Delta \sigma$  и  $M_0$  не должны коррелировать между собой во всем диапазоне их изменений [Гусев, 1984], если только «не читать мантру» про самоподобие разрушения на всех масштабных уровнях.

Во-первых, вполне очевидно, что средним снимаемым упругим деформациям в масштабе магнитуд 2–4 (линейный масштаб приблизительно 200–2000 м) будет соответствовать свой эффективный модуль упругости  $G_{\rm ef}$ , и, конечно, его значение отличается от модуля G для лабораторного образца, выпиленного из цельного участка породы. В масштабе усреднения сотен метров обязательное влияние на эффективное значение модуля упругости окажут трещины, существующие в горном массиве.

В масштабе усреднения первых десятков километров (масштаб земной коры), который отвечает землетрясениям магнитудой 6–8, обязательное влияние на модуль упругости окажут зоны разломов. Трещиноватость этих зон многократно выше трещиноватости смежных с ними блоков коры. Таким образом, значения  $G_{\rm ef}$  уменьшаются с ростом характерного размера задачи. В цитированной в статье монографии<sup>3</sup> приведены результаты о снижении модуля  $G_{\rm ef}$  в зависимости от линейного размера L на небольших масштабах усреднения (до сотен метров). Это уменьшение описывается слабой степенной зависимостью от L:  $G_{\rm ef} \sim L^{-0.06}$  (формула (4.27) на с. 233). Эта слабая зависимость в 10 и 100 раз определяет изменение усредненного модуля упругости на 15 и 30 % соответственно.

Второй важный момент, который определяет отсутствие прямой корреляции между указанными выше параметрами, заключается в независимости снимаемой деформации,  $\varepsilon$ , и объема очага, V. По сути, сравнивать между собой следует снимаемые напряжения,  $\Delta \sigma$ , и произведение  $G_{\rm ef} \cdot \varepsilon$ . В этом случае с учетом слабой зависимости  $G_{\rm ef}$  от масштаба усреднения деформаций (объем очага) корреляция должна существовать по крайней мере в некотором диапазоне магнитуд землетрясений.

На самом деле выражение  $M_0 = G \cdot V \cdot \varepsilon$  после нахождения сброшенных напряжений  $\Delta \sigma \sim G \cdot e$  надо использовать для определения объема очага. Для случая сферического очага, который чаще всего рассматривается при оценках сброшенных напряжений, выражение для объема очага принимает форму  $V \approx 1.8 \cdot M_0 / \Delta \sigma$  в соответствии с известной формулой Эшелби (выражение (11) из статьи).

Поскольку для сейсмической энергии имеется соотношение  $Es = \sigma_a SD (\sigma_a - так называемое$ кажущееся напряжение), вполне очевидно, что $отношение <math>Es/M_0 = \sigma_a/G$ , т.е. приведенная сейсмическая энергия,  $e_{pR}$ , по физическому смыслу отвечает деформации. Поэтому и вполне логичен результат, полученный в работе, о взаимосвязи сброшенных напряжений  $\Delta \sigma$  и  $e_{pR} = Es / M_0$ . Но эта взаимосвязь будет проявляться для разных масштабов событий, только пока мы остаемся в определенном диапазоне магнитуд землетрясений (не более трех единиц).

> Юрий Леонидович РЕБЕЦКИЙ, доктор физико-математических наук E-mail: reb@ifz.ru

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Скоркина А.А. **2017**. Изучение спектральных свойств камчатских землетрясений магнитудного диапазона 3–6: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Петропавловск-Камчатский, 130 с.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Гусев А.А. **1984**. Описательная статистическая модель излучения очага землетрясения и ее применение к оценке короткопериодного сильного движения. *Вулканология и сейсмология*, 1: 3–22; Гусев А.А., Гусева Е.М. **2014**. Скейлинговые свойства характерных частот очаговых спектров землетрясений Камчатки. *Доклады РАН. Науки о Земле*, 458(1): 88–91.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.

## Отзыв на Письмо в редакцию Ю.Л. Ребецкого «О некоторых аспектах статьи "О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии"»

И статья, и письмо в редакцию, инициированное этой статьей, поднимают интересные и важные моменты, связанные с физикой очага землетрясения, а именно, в данном случае, с величинами сброса напряжений и приведенной сейсмической энергией. Заметим, что обсуждаемая приведенная сейсмическая энергия, с точностью до сомножителя равного упругому модулю, эквивалентна более традиционно обсуждаемой характеристике величине кажущихся напряжений. Так как разброс величин сброса напряжений и приведенной сейсмической энергии весьма велик (в разы, иногда до 2 порядков величины), то вариации величины упругого модуля оказываются несущественны, и фактически речь идет о взаимосвязи величин сброса напряже-

ний и кажущихся напряжений. Из теоретических соображений и более детальных оценок (см., например, Annemarie Baltay et al. 2011. Variability in earthquake stress drop and apparent stress. *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L06303, doi:10.1029/2011GL046698) следует, что эти величины пропорциональны и, в первом приближении, обычно полагаются не зависящими от сейсмического момента (или магнитуды).

Важно, однако, что все обсуждаемые параметры сильно (и непонятно) вариабельны, и в разных случаях вполне могут наблюдаться специфические эффекты. Рассмотрение этих эффектов важно для понимания изменчивости характеристик очага землетрясения. Отсюда не вызывает сомнения, что обсуждение поднятых вопросов представляет существенный интерес.

Михаил Владимирович РОДКИН, доктор физико-математических наук (Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва). E-mail: rodkin@mitp.ru

## LETTER TO THE EDITOR

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.055-059

## On some aspects of the article «On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy»

Yuryi L. Rebetsky

УДК 550.34.094

## Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia *E-mail: reb@ifz.ru*

In the article by N.A. Sycheva and L.M. Bogomolov, the authors proposed to combine the interrelated data on the stress drop in the earthquake sources,  $\Delta\sigma$ , and reduced seismic energy,  $e_{\rm PR}$ , to analyze the dependence of these parameters on earthquake scale along with expansion of the measurement statistics (assessments). The dependence of these parameters of a source on the seismic moment or on the earthquake magnitude within  $2.2 \leq M \leq 4.0$  magnitude range has been determined using the example of the Northern Tien Shan (Bishkek geodynamic polygon with the KNET network). The author of the letter to the editor notes the article conclusions to be limited, because such relationship is only manifested within the more or less narrow range of the magnitudes. Attention is also drawn to the semantic difference between the  $\Delta\sigma$  and  $e_{\rm PR}$  parameters. It is the reduced seismic energy that reflects the mean strain in the source area, and its appliance to the analysis of scale dependences of earthquake sources is more informative.

Conclusion of the article by N.A. Sycheva and L.M. Bogomolov begins with the phrase: "To analyze the very knotty issue of the presence or absence of correlations between the stress drop in the sources of earthquakes in Northern Eurasia and their energy characteristics...". In the article, the main focus is landing on the question of the relationship between the stress drop in the earthquake source, Ds, and the scalar seismic moment M0. It is argued (formula (20) from the article) that the relationship between  $M_0$  and the reduced seismic energy  $e_{\rm PR} = Es/M_0$  is described by regression by the form proportional to  $\Delta\sigma$  ( $M_0$ ).

What should be mentioned in this regard? First of all, the fact that the reduced seismic energy and scalar seismic moment are determined based on the initial seismic data of different types, and the characteristics of the earthquake source: stress drop and seismic moment have the different dimensions ( $\Delta\sigma$  [Pa], and  $M_0$  [N m]).

The seismic moment is determined by the low-frequency component of the S-wave spectrum and does not depend on the dynamics of the fracture development, while the earthquakes energy characterizes the high-frequency component of seismic waves. It is this circumstance that makes it possible to consider them as two independent parameters of the earthquake source. The consequence of this is the independence of the source size and the stress drop. Detailed seismological studies show the existence of similarity of a seismic process only in a certain range of magnitudes [Skorkina, 2017]<sup>1</sup>. It should be noted that the problem of scaling (scale invariance) was given much attention in the works of A.A. Gusev [Gusev, 1984; Gusev, Guseva, 2014]<sup>2</sup>.

In addition to the main factor noted above, there are a number of reasons that affect the problem under consideration, which can complicate the obtaining of a correct solution to this problem. Thus, only in recent decades a sufficient number of broadband seismic stations satisfying these requirements have appeared.

If the stresses characterize the force divided by the area, then the seismic moment, according to its definition  $(M_0 = G \cdot S \cdot D = G \cdot V \cdot \varepsilon)$ , which is equivalent to formula (7) in the article) is proportional to the average elastic deformation  $\varepsilon$ , removed during the realization of seismic displacement at the fracture, i.e. earthquake. Here, as in the article: G – the shear modulus, D – the displacement amplitude in the source, S – the rupture area. The source volume is  $V = S \cdot L$  (L is the characteristic size of the source), and the average deformation is  $\varepsilon = D/L$ . Parameters  $\Delta \sigma$  and  $M_0$  should not correlate with each other in the entire range of their changes [Gusev, 1984], unless one "reads the mantra" about destruction self-similarity at all scale levels.

First, it is quite evident, that the average elastic released strains on a scale of magnitudes 2–4 (linear scale is approximately 200–2000 m) will correspond to their effective elastic modulus  $G_{\rm ef}$ , and, of course, its value differs from the modulus G for a laboratory sample cut from an integral block of rock. On the averaging scale of hundreds of meters, cracks in the rock mass will obligatory affect the effective value of the elastic modulus.

On the averaging scale of the first tens of kilometers (the scale of the earth's crust), which corresponds to earthquakes with a magnitude of 6-8, the fault zones will obligatory affect the elastic modulus. The fracturing of these zones is many times higher than the fracturing of the adjacent crustal blocks. Thus, the  $G_{\rm ef}$  values decrease as the characteristic size of the problem grows. The monograph<sup>3</sup> cited in the article presents the results on the decrease in the  $G_{\rm ef}$  modulus as a function of the linear size L on the small averaging scales (up to hundreds of meters). This decrease is described by a weak power-law dependence on *L*:  $G_{ef} \sim L - 0.06$  (formula (4.27) on p. 233). This weak dependence when the earthquake energy changes by 10 and 100 times determines the change in the averaged elastic modulus by 15 and 30 %, respectively.

The second important point, which determines the absence of a direct correlation between the above parameters, is the independence of the released strain,  $\varepsilon$ , and the volume of the source, V. In fact, it is necessary to compare the stress drop,  $\Delta \sigma$ , and the product  $G_{\text{ef}} \cdot \varepsilon$ with each other. In this case, with regard to the weak dependence of  $G_{\text{ef}}$  on the scale of deformation averaging (volume of the source), the correlation should exist at least in a certain range of earthquake magnitudes.

In fact, when the stress drop is found  $\Delta \sigma \sim G \cdot \varepsilon$ , the expression  $M_0 = G \cdot V \cdot \varepsilon$  should be used to de-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Skorkina A.A. **2017**. [Study of spectral properties of the Kamchatka earthquakes in the magnitude range of 3–6]: [dis. ... Cand. Sci. (Phys. and Math.)]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 130 p.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Gusev A.A. **1984**. [Descriptive statistical model of earthquake source radiation and its application to an estimation of short-period strong motion]. *Volcanology and Seismology*, 1: 3–22; Gusev A.A., Guseva E.M. **2014**. Scaling properties of corner frequencies of Kamchatka earthquakes. *Doklady Earth Sciences*, 458(1): 1112–1115. https://doi.org/10.1134/s1028334x14090062

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Kocharyan G.G. *Geomechanics of faults*. Moscow: GEOS, 2016. 424 p.

termine the volume of the source. For the case of a spherical source, which is most often considered for evaluating the stress drop, the expression for the volume of the source takes the form  $V \approx 1.8 \cdot M_0 / \Delta \sigma$  in accordance with the wellknown Eshelby's formula (expression (11) from the article).

Since, there is a ratio  $Es = \sigma_a S D$  for seismic energy ( $\sigma_a$  is the so-called apparent stress),

it is quite evident, that the ratio  $Es/M_0 = \sigma_a/G$ , i.e. the reduced seismic energy,  $e_{pR}$ , physically corresponds to deformation. Therefore, the result obtained in the work on the relationship between the stress drop  $\Delta\sigma$  and  $e_{pR} = Es/M_0$  is quite logical. But this relationship will manifest itself for different scales of events, only as long as we remain in a certain range of earthquake magnitudes (no more than three units).

> Yuri L. Rebetsky, Doctor of Physics and Mathematics E-mail: reb@ifz.ru

## Response to the letter to the editor by Yu. L. Rebetsky On some aspects of the article "On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy"

Both the article and the letter to the editor, initiated by this article, raise interesting and important questions related to the physics of the earthquake source, namely, in this case, with the magnitudes of stress drop and reduced seismic energy. Note that the discussed reduced seismic energy is equivalent to the more traditionally discussed characteristic – the magnitude of the apparent stress up to a factor equal to the elastic modulus. Since the spread in the values of stress drop and reduced seismic energy is very large (several times, sometimes up to 2 orders of magnitude), variations in the value of the elastic modulus turn out to be insignificant, and in fact, we are talking about the relationship between the values of stress drop and apparent stress. From theoretical

reasons and more detailed assessments (see, for example, Annemarie Baltay et al. 2011. Variability in earthquake stress drop and apparent stress. *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L06303, doi: 10.1029/2011GL046698) it follows that these values are proportional and, as a first approximation, are usually assumed to be independent of the seismic moment (or magnitude).

It is important, however, that all discussed parameters are highly (and incomprehensibly) variable, and specific effects may well be observed in different cases. Consideration of these effects is important for understanding the variability of the characteristics of an earthquake source. Hence, there is no doubt that the discussion of the raised issues is of significant interest.

Michael V. Rodkin, Doctor of Physics and Mathematics (Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS, Moscow). E-mail: 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)

#### НАУЧНАЯ СМЕНА



## УДК 551.32

Кораблев Олег Андреевич

В 2019 г. окончил Технический нефтегазовый институт Сахалинского государственного университета (СахГУ) по специальности «нефтегазовое дело». В настоящее время магистрант 2 курса Технического нефтегазового института СахГУ по специальности «геоэкология» направления подготовки «экология и природопользование». Проходит преддипломную практику в научно-исследовательской лаборатории дистанционного зондирования Земли СахГУ и РАН под руководством доктора технических наук, профессора Владимира Михайловича Пищальника, в качестве научного консультанта выступает доктор физико-математических наук, доцент Игорь Георгиевич Минервин. Основной деятельностью О.А. Кораблева в лаборатории является получение и обработка космических снимков в оперативном режиме. Область научных интересов магистранта – изучение взаимодействия океана и атмосферы, дистанционное зондирование Земли с помощью беспилотных летательных аппаратов.

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.060-066

# О новом предикторе, влияющем на ледообразование в Охотском море

© 2021 О. А. Кораблев

Сахалинский государственный университет, Технический нефтегазовый институт, Южно-Сахалинск, Россия E-mail: oleg.korablev.00@mail.ru

**Резюме.** При прогнозе динамики, дрейфа и перераспределения льдов необходимо принимать во внимание теплообмен между тремя средами – водой, льдом и воздухом. Известно, что составляющие теплового баланса меняются довольно сильно в зависимости от того, на границе каких сред они рассматриваются. На участках чистой воды велики испарение и турбулентный теплообмен с атмосферой. Испарение с поверхности льда и снега значительно меньше. Для изучения появления льда необходимо учитывать только те среды, между которыми происходит интенсивный теплообмен, – это вода и атмосфера. В статье на основе статистического метода корреляционного анализа по данным о температуре воздуха на гидрометеорологических станциях и площади льда с открытых источников проведено исследование термодинамических процессов, протекающих над акваторией моря. Найден новый предиктор, указывающий на высокую взаимосвязь 0.90–0.95 между суммой градусов суточной разности температур на гидрометеорологических станциях Оха и Оймякон и данными площади морского льда в северо-западном регионе Охотского моря на последний день месяца.

Ключевые слова: гидрометеорологические станции, сумма градусодней мороза, корреляции, морской лед

## On a new predictor affecting ice formation in the Sea of Okhotsk

Oleg A. Korablev

Sakhalin State University, Technical Oil and Gas Institute, Yuzno-Sakhalinsk, Russia E-mail: oleg.korablev.00@mail.ru

**Abstract.** Heat exchange between the three media – water, ice and air – must be taken into account when predicting the ice dynamics, drift and redistribution. It is known that the components of the heat balance vary quite strongly depending on the boundary of which media they are considered. Evapora-

tion and turbulent heat exchange with the atmosphere are great in the areas of pure water, while evaporation from the surface of ice and snow is much less pronounced. To study the appearance of ice, it is necessary to consider only those environments between which intense heat exchange takes place; these environments are water and the atmosphere. This article studies the thermodynamic processes occurring over the seawater area by the statistical method of correlation analysis using the data on air temperature collected at hydrometeorological stations and those on the ice area from open sources. A new predictor is proposed, indicating a high correlation of 0.90–0.95 between the sum of degrees of daily temperature difference at the hydrometeorological stations of Okha and Oymyakon and the data on the area of the sea ice in the northwestern region of the Sea of Okhotsk on the last day of the month.

Keywords: hydrometeorological stations, accumulated freezing degree-days, correlations, sea ice

Для цитирования: Кораблев О.А. О новом предикторе, влияющем на ледообразование в Охотском море. *Геосистемы переходных зон*, 2021, 5(1), с. 60–66. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.060-066

## Введение

На шельфе Охотского моря в последние 20 лет идет активная разведка и добыча углеводородов. Специфика разработки морских месторождений нефти и газа предусматривает круглогодичное транспортное (в том числе и судовое) обслуживание производственных объектов, естественным препятствием для которого служит ледяной покров. Для устойчивого развития данного направления необходимо принимать во внимание как можно больше предикторов (прогностических параметров), которые помогут понять, как будет в дальнейшем изменяться ледовый режим.

Прогноз зимних ледовых процессов (нарастания толщины и увеличения количества льда) учитывает прежде всего два основных фактора: температуру воздуха и режим ветра. На интенсивность ледообразования к определенному моменту времени влияет сумма отрицательных температур воздуха, накопленная от дня перехода температуры воздуха через 0 °С к отрицательным значениям до дня, на который прогнозируется данная ледовая характеристика (даты появления льда, даты достижения льдом определенной толщины и т.д.). Эту величину принято называть суммой градусодней мороза (СГДМ) [Думанская, Котилевская, 2009].

Охотское море расположено в умеренных широтах, к юго-востоку от полюса холода

*For citation*: Korablev O.A. On a new predictor affecting ice formation in the Sea of Okhotsk. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, 5(1), pp. 60– 66. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.060-066

Северного полушария, и подвержено влиянию муссонной циркуляции, формирующейся на границе самого большого материка и самого большого океана на земном шаре. Ввиду значительных пространственных размеров (протяженность с юго-запада на северо-восток более 2.5 тыс. км), особенностей циркуляции вод и воздушных масс, рельефа дна и конфигурации береговой черты, гидрометеорологические условия отдельных районов Охотского моря существенно различны. Определяющим фактором образования льда в Охотском море является влияние зимнего муссона, который не только доставляет на акваторию моря холодные воздушные массы, но и обусловливает постоянный дрейф льда на всей акватории моря с южной составляющей. Следует отметить, что в период действия зимнего муссона холодные воздушные массы поступают на акваторию моря по двум генеральным направлениям: с северо-запада – из районов, прилегающих к полюсу холода, центр которого находится в районе села Оймякон в Якутии, и с северовостока – из районов Восточной Арктики. Данное обстоятельство обусловливает существенные различия в условиях генерации льда не только между северной и южной частями моря, но и между северо-западным и северо-восточным его районами, поскольку указанные воздушные потоки значительно различаются по своим метеорологическим характеристикам<sup>1</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Моделирование динамики природных процессов в Охотском и Японском морях в целях обеспечения безопасности обустройства и эксплуатации месторождений углеводородов на шельфе о. Сахалин: отчет о НИР (заключит.). **2016**. Рук. д.т.н. В.М. Пищальник. Южно-Сахалинск. № ГР НИОКР 114042140017; Рег. № ИКРБС АААБ16-216032270071-7.

Modeling the dynamics of natural processes in the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan to ensure the safety of development and operation of hydrocarbon fields on the shelf of the Sakhalin Island: research report (final). 2016. Research manager, Doctor in Engineering V.M. Pischalnik. Yuzhno-Sakhalinsk.

Образующийся в северных районах ледяной покров на фоне зимнего муссона и под воздействием отмеченных выше воздушных потоков дрейфует в юго-восточном и юго-западном направлениях соответственно. При этом толщина льда под воздействием термических и динамических факторов постоянно нарастает. В результате формируется главная и характерная особенность ледяного покрова дальневосточных морей – увеличение толщины льда по мере продвижения его с севера на юг (Отчет о НИР, 2016<sup>2</sup>; [Думанская, 2013]).

В исследованиях [Пищальник и др., 2016] наибольшие по абсолютной величине значения коэффициентов корреляции между площадью ледяного покрова Охотского моря и СГДМ для отдельных гидрометеорологических станций (ГМС) получены для ГМС Охотск и Магадан (соответственно 0.73 и 0.72).

При прогнозировании ледовых процессов необходимо понимать направленность изменений ледового режима как в Охотском море в целом, так и в отдельном конкретном ледовом районе. Основой любых прогностических оценок является также знание закономерностей изменчивости исследуемого явления в предшествующие временные периоды.

Известно, что при прогнозе динамики льдов, дрейфа и перераспределения льдов следует учитывать в первую очередь взаимодействие ветра, атмосферного давления, скорость подледных течений. Помимо учета динамических факторов, необходимо принимать во внимание и термические – теплообмен с атмосферой и водной средой. Учет этих факторов – сложная задача, так как необходимо рассматривать теплообмен между тремя средами – водой, льдом и воздухом.

Известно, что составляющие теплового баланса меняются довольно сильно в зависимости от того, на границе каких сред они рассматриваются. На участках чистой воды велики испарение и турбулентный теплообмен с атмосферой. Испарение с поверхности льда и снега значительно меньше. Потоки лучистого тепла также зависят от свойств среды. Например, весной большую роль в тепловом балансе на границе лед-воздух играет процесс отражения солнечной радиации, в то время как на границе вода-воздух влияние его гораздо меньше. В статье на основе изучения термодинамических процессов, протекающих над акваторией Охотского моря, исследован в качестве предиктора параметр, связанный с влиянием холодных масс Оймякона и подстилающего температурного поля открытой поверхности моря.

### Методы и материалы

Исследование термодинамических процессов, протекающих над акваторией Охотского моря, проведено на основе статистического метода корреляционного анализа по данным из открытых источников (указаны ниже) о температуре воздуха на гидрометеорологических станциях и площади льда. Для учета закономерностей распределения теплового баланса в исследуемом районе был построен и проанализирован многолетний ряд температур воздуха на ГМС Оймякон с ноября 1943 по апрель 2020 г., что позволило выявить наличие влияния Оймякона на ледовитость моря.

Исходя из этого, пришли к выводу, что необходимо изучить в качестве потенциального предиктора параметр, связанный с влиянием холодных масс Оймякона и подстилающего температурного поля открытой поверхности моря с температурой -1.8 °C, так как при этой температуре начинает образовываться лед в условиях соленой морской воды. Поступление холодных масс с Оймякона (полюса холода) приводит к отбору тепла от открытой поверхности моря, а это, в свою очередь, к ледообразованию.

Наличие связи между количеством суточной теплоты, получаемой воздухом от поверхности моря, и суточным количеством теплоты ледообразования, выявляют уравнения, показывающие связь теплоемкости воздуха и теплоты ледообразования.

Количество суточной теплоты ΔQ, получаемой воздухом от поверхности моря, пропорционально разности между температурой холодных масс, приходящих с Оймякона, и температурой нагретого за счет моря воздуха на ГМС, оно выражается формулой

$$\Delta Q_{BO3D} = c_{BO3D} m_{BO3D} (t_2 - t_1) = c_{BO3D} m_{BO3D} \Delta t,$$

где c – удельная теплоемкость воздуха, m – масса воздуха,  $\Delta t$  – разница между температурой  $t_1$  холодных масс, перемещающихся

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Моделирование динамики природных процессов в Охотском и Японском морях..., 2016.

за счет зимнего муссона с Оймякона<sup>3</sup>, и температурой  $t_2$ , на ГМС Оха<sup>4</sup>.

Количество теплоты ледообразования в первом приближении будет равно отобранной теплоте от воды, пошедшей на нагрев воздуха:

$$\Delta Q_{\text{льда}} = \Delta Q_{\text{воз}}$$

В свою очередь количество теплоты ледообразования выражается формулой:

$$\Delta Q_{\rm \tiny nbda} = \lambda_{\rm \tiny nbda} \Delta m_{\rm \tiny nbda},$$

где  $\lambda$  – удельная теплота ледообразования,  $\Delta m$  – прирост массы льда.

Выразим массу льда, образовавшуюся за сутки:

$$\Delta m_{_{\rm ЛЬЛА}} = \rho_{_{\rm ЛЬЛA}} \Delta V_{_{\rm ЛЬЛA}} = \rho_{_{\rm ЛЬЛA}} h_{_{\rm ЛЬЛA}} \Delta S_{_{\rm ЛЬЛA}}$$

где  $\Delta S$  – прирост площади льда, h – толщина льда,  $\rho$  – плотность льда,  $\Delta V$  – прирост объема льда.

В зоне генерации льда толщину можно считать равномерно распределенной, тогда:

 $\rho_{\text{льда}} h_{\text{льда}} = \text{const}; c_{\text{возд}} m_{\text{возд}} = \text{const}.$ 

Поэтому за каждый месяц сопоставили площадь льда на последний день календарного месяца (S) и сумму градусов суточной разницы температур (СГСРТ,  $\sum \Delta t$ ). В отличие от СГДМ, где используется только температура с одной ГМС, в СГСРТ используется разница между температурами воздуха по данным двух гидрометеостанций. Площади морского льда в северо-западном регионе [Минервин и др., 2015] Охотского моря были взяты по данным мультисенсорного анализа протяженности морского льда (MASIE), они размещены в свободном доступе на сайте Национального центра данных по снегу и льду<sup>5</sup>.

## Результаты и обсуждение

Охотское море относится к категории замерзающих морей, в которых формируется сезонный ледяной покров. Все выборки по температурам и площади морского льда первоначально брались с октября по апрель.

На первом этапе был построен многолетний ряд СГДМ на метеостанции Оймякон с ноября 1943 г. по апрель 2020 г. Самые ранние общедоступные и открытые данные по ежедневной температуре воздуха на ГМС Оймякон были найдены с 1943 г. За столь продолжительный период времени в данных метеостанции было несколько пропусков в замерах. Пропуски восстанавливались мной по методу прямой интерполяции.

По графику видно, что СГДМ уменьшается, следовательно, температура воздуха растет. Особо теплыми были сезоны 1980–1981 и 2010–2011 гг. Суммы СГДМ многих сезонов хорошо согласуются с линией тренда (красная линия). Начиная с 1980 г. наблюдается повышение температуры воздуха на 0.25 % в год.



**Рис. 1.** График изменения суммы градусодней мороза на станции Оймякон с ноября 1943 по апрель 2020 г. **Figure 1.** Graph of change in accumulated freezing degree-days at the Oymyakon station from November 1943 to April 2020

URL: https://rp5.ru/Apxив\_погоды\_в\_Oxe\_(аэропорт) (accessed 05.02.2020).

<sup>5</sup> National Snow & Ice Data Centre.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Архив данных температуры воздуха на ГМС Оймякон [Archive of the data on the air temperature on the Oimyakon HMS]. URL: http://thermo.karelia.ru/weather/w\_history.php?town=oim&month=7&year/ (accessed 16.02.2020).

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Архив данных температуры воздуха на ГМС Оха [Archive of the data on the air temperature on the Okha HMS].

URL: http://masie\_web.apps.nsidc.org/pub/DATASETS/NOAA/G02186/shapefiles/ (accessed 10.09.2020).

Поскольку Оймякон является полюсом холода для акватории Охотского моря, можно предположить, что потепление в этой точке влияет на ледовитость моря.

На втором этапе мы стали пробовать различные комбинации между данными СГДМ на станциях Оймякон и Оха и площадью льда в северо-западном регионе Охотского моря, чтобы найти наибольший коэффициент корреляции. Сначала сопоставили СГДМ станций Оймякон и Оха с данными площади морского льда в северо-западном регионе Охотского моря с 2006 г. (данные мультисенсорного анализа протяженности морского льда стали доступны лишь с 2006 г.). Коэффициент корреляции оказался очень низким. Коэффициент же корреляция СГДМ между станциями был ощутимый – более 0.8 (табл. 1).

Из исследуемых сезонов пришлось исключить октябрь, так как в этом месяце еще нет льда и учет данных по нему искажает зависимости, снижая показатель корреляции (табл. 2). Коэффициент корреляции снижается также в марте и апреле, практически в 2 раза, поскольку в середине марта и начале апреля каждый год резко меняется теплообмен между холодными массами воздуха и моря из-за перекрытия водных масс в этой акватории льдами. Поэтому март и апрель из расчетов тоже исключили (табл. 2).

Выяснив хорошую корреляционную зависимость СГДМ Оймякона и Охи, разность между СГДМ этих станций сравнили с площадью морского льда за последний день месяца с 2006 по 2019 г. в северо-западном регионе Охотского моря (табл. 1). С учетом того, что коэффициент корреляции СГДМ между станциями составил 0.8, на третьем этапе провели расчет корреляции между суммой градусов суточной разницы температур (СГСРТ) на ГМС Оха и Оймякон с площадью морского льда за последний день месяца в северо-западном регионе Охотского моря. При таком подходе коэффициент корреляции достиг величины 0.90–0.95.

Сравнив корреляции, полученные за 2 периода времени, с ноября по февраль (табл. 2) и с марта по апрель (табл. 3), можно сказать, что гипотеза относительно предиктора работает. С ноября по февраль происходит нарастание льда, холодные воздушные потоки с Оймякона забирают тепло у поверхности моря и образуется лед. А с марта по май открытая поверхность северо-западного региона Охотского моря закрывается льдом и холодному воздуху больше не с чем контактировать, поэтому коэффициент корреляции получается с противоположным знаком.

Для составления прогноза и предупреждения аварийных ситуаций важна детальная проработка вопросов, связанных с начальной стадией ледообразования, которая фактически является основой формирования всего ледообразования в Охотском море. Особенно важно это для районов, где производится обслуживание буровых платформ судами в зимний период. Принято решение не рассматривать в целом все Охотское море, а только первый район, потому что там происходит генерация льда и следует уточнить, как это происходит. Мы рассматриваем период времени с ноября по февраль, когда вода еще не закрыта льдом,

*Таблица 1.* Корреляции СГДМ на станциях Оймякон и Оха с данными площади морского льда в северо-западном регионе Охотского моря с 2006 по 2019 г.

*Table 1.* Correlations of the accumulated freezing degree-days at the Oymyakon and Okha stations with the data on the sea ice area in the northwestern region of the Sea of Okhotsk from 2006 to 2019

Корреляция	2006– 2007	2007– 2008	2008– 2009	2009– 2010	2010– 2011	2011– 2012	2012– 2013	2013– 2014	2014– 2015	2015– 2016	2016– 2017	2017– 2018	2018– 2019	Ср. знач. *100 %
Оймякон СГДМ – S <sub>льда</sub>	-0.16	-0.02	0.10	0.39	0.39	0.32	0.0	0.03	0.43	0.33	-0.28	0.38	0.04	22.59
Оха СГДМ — S <sub>льда</sub>	-0.35	-0.22	-0.27	-0.23	-0.31	-0.38	-0.43	-0.50	-0.28	-0.29	-0.39	-0.12	-0.35	32.29
СГДМ <sub>Ойм</sub> – СГДМ <sub>Оха</sub>	0.95	0.94	0.90	0.71	0.48	0.71	0.89	0.78	0.63	0.76	0.97	0.80	0.89	82.04

Таблица 2. Корреляции СГСРТ на	ГМС Оха и Оймякон с площадью	• морского льда (S <sub>льла</sub> )	за последний день
месяца в северо-западном регионе	Охотского моря в зимние сезоны	с ноября по февраль	2006-2019 гг.

*Table 2.* Correlation of the accumulated degrees of daily temperature difference (ADDTD) at the Okha and Oymyakon hydrometeorological stations with the sea ice area for the last day of the month in the northwestern region of the Sea of Okhotsk during winter seasons from the November to the February of 2006–2019

Ме-	2006–	2007–	2008–	2009–	2010–	2011–	2012–	2013–	2014–	2015–	2016–	2017–	2018–
сяц	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
XI	-623	-829	-799	-759	-962	-966	-772	-834	-976	-849	-734	-792	-725
	1.7	2.6	1.08	4.2	1.02	2.2	1.7	1.5	3.5	1.9	17.1	10.1	1.2
XII	-1511	-1632	-1755	-1756	-1896	-1993	-1734	-1773	-2050	-1951	-1577	-1720	-1633
	29.2	23.5	8.8	19.3	14.1	27.9	28	14.1	19.7	13.9	34.3	17.4	18.9
I	-2456	-2517	-2717	-2725	-2816	-2874	-2578	-2499	-2732	-2703	-2540	-2522	-2562
	41	43.7	28.9	30.9	30.3	27.9	35.9	40	30.2	33	41.1	30.8	33
п	-3164	-3352	-3427	-3387	-3722	-3510	-3429	-3064	-3509	-3387	-3259	-2952	-3241
	43.5	43.7	42.9	39.9	42.6	43.7	41.8	43.5	34	43.6	41.2	43	43.7
К,	-93.97	-94.20	-98.29	-99.88	-99.87	-94.41	-94.63	-97.18	-98.08	-98.62	-91.08	-96.80	-99.82

*Примечание*. Здесь и в табл. 3 первая строка – СГСРТ, вторая – S<sub>льла</sub>.

*Note.* Here and in the Table 3, first line is ADDTD, second one is ice area  $(S_{\text{IIRIA}})$ .

*Таблица 3.* Корреляции СГСРТ на ГМС Оха и Оймякон с площадью морского льда (*S*<sub>льда</sub>) за последний день месяца в северо-западном регионе Охотского моря в зимние сезоны с марта по май 2006–2019 гг.

*Table 3.* Correlation of the accumulated degrees of daily temperature difference at the Okha and Oymyakon hydrometeorological stations with the sea ice area for the last day of the month in the northwestern region of the Sea of Okhotsk during winter seasons from the March to the May of 2006–2019

Ме-	2006–	2007–	2008–	2009–	2010–	2011–	2012–	2013–	2014–	2015–	2016–	2017–	2018–
сяц	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
III	-3753	-3950	-3940	-3943	-4183	-4052	-3956	-3694	-4196	-3920	-3790	-3454	-3826
	40.4	29.48	23.42	40.98	40.40	43.7	38.22	33.9	27.7	38.61	25.2	42.4	41.8
IV	-3973	-4302	-4208	-4174	-4446	-4290	-4202	-4031	-4496	-4164	-3976	-3641	-4009
	19.9	22.18	17.57	32.05	25.89	29.9	16.59	14.2	17.9	27.8	13.5	28.2	18.8
v	-3913	-4230	-4248	-4005	-4429	-4241	-4076	-4039	-4479	-4186	-3979	-3646	-3974
	6.48	7.9	8.4	11.3	8.4	11.6	15.6	6.1	7.4	6.5	7.3	5.29	4.13
К,	78.51	62.05	86.3	3.52	80.6	69.5	83.8	96.3	83	80.6	94.2	80.5	83.6

потому что лед является изолятором и, когда он перекрывает открытую воду, процесс теплообмена совершенно меняется.

Предыдущие работы различных авторов показали связь между СГДМ и площадью льда, однако, как можно видеть на практике, кривые роста льда и СГДМ не всегда отражают истинную картину. Также указывают начальной стадией образования льда дату перехода через 0 °С, но вода может быть сильнее переохлаждена, и ее температура может постоянно колебаться в зависимости от внешних факторов. А вот предиктором ледообразования можно считать между температурами воздуха в направлениях, откуда дует ветер и куда он дует, это и есть температура, необходимая для формирования льда и его последующего нарастания. Этот показатель учитывает время задержки переноса воздушных масс и не зависит от случайных переходов температуры через 0 °C.

## Заключение

Анализ показал хорошую корреляцию суммы градусов суточной разницы температур на ГМС Охи и Оймякона за 2006–2019 гг. с данными площади морского льда в северо-западном регионе Охотского моря, коэффициент корреляции составляет порядка 0.90–0.95. Это обосновывает выбор данного параметра в качестве предиктора, влияющего на ледообразование в данном регионе. Параметр СГСРТ может использоваться в будущем для выработки прогностического правила предсказания начала образования и нарастания льда. При этом он может работать только в условиях интенсивного теплообмена между водой и атмосферой. В качестве подтверждающего фактора было выяснено, что при нарушении этого условия коэффициент корреляции меняет знак.

В связи с этим необходимо в дальнейшем детально исследовать этот параметр для других частей Охотского и Японского морей.

#### Список литературы

1. Думанская И.О. **2013.** Изменение климатических ледовых характеристик Охотского моря в конце XX – начале XXI века. *Труды Гидрометцентра России*, 350: 110–141.

2. Думанская И.О., Котилевская А.М. **2009.** Оценка возможности использования прогностических методик XX века в современной практике ледового обслуживания мореплавания на неарктических морях России. *Труды ГМЦ РФ*, 343: 67–88.

3. Минервин И.Г., Романюк В.А., Пищальник В.М., Трусков П.А., Покрашенко С.А. 2015. Районирование ледяного покрова Охотского и Японского морей. Вестник Российской академии наук, 85(1): 24–32.

4. Пищальник В.М., Романюк В.А., Минервин И.Г., Батухтина А.С. **2016.** Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. *Известия ТИНРО*, 185: 228–239. https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-185-228-239

#### References

1. Dumanskaya I.O. **2013.** [Change in climatic ice characteristics of the Sea of Okhotsk in the late XX – early XXI century]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcenter of Russia*], 350: 110–141.

2. Dumanskaya I.O., Kotilevskaya A.M. **2009.** [Estimation of possibility of the use of forecasting methods of the 20<sup>th</sup> century in contemporary practice of the ice service of navigation in non-arctic seas of Russia]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [*Proceedings of the Hydrometcenter of Russia*], 343: 67–88.

3. Minervin I.G., Romanyuk V.A., Pishchalnik V.M., Truskov P.A., Pokrashenko S.A. **2015.** Zoning of the ice cover of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* = *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 85: 132–139.

4. Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A., Minervin I.G., Batuhtina A.S. **2016.** Analysis of dynamics for anomalies of the ice cover in the Okhotsk Sea in the period from 1882 to 2015. *Izvestiya TINRO*, 185: 228–239. (In Russ.). https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-185-228-239

## Об авторе

КОРАБЛЕВ Олег Андреевич, студент 2 курса Технического нефтегазового института направления подготовки «экология и природопользование» (магистратура), лаборатория дистанционного зондирования Земли СахГУ и РАН, Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, oleg.korablev.00@mail.ru KORABLEV Oleg A., second year Student of Technical Oil and Gas Institute, "Ecology and Nature management" specialty (master's program), Research laboratory of remote sensing of the Earth of Sakhalin State University and Russian Academy of Sciences, Sakhalin State University, Yuzno-Sakhalinsk, oleg.korablev.00@mail.ru

**About Author** 

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



Никонов Василий Сергеевич

Никонов Василий Сергеевич в 2019 г. окончил университет управления «ТИСБИ» по специальности «Информатика и вычислительная техника», после чего поступил в магистратуру Сахалинского государственного университета (СахГУ) по направлению «Экология и природопользование». Научной деятельностью занимается на базе Научно-исследовательской лаборатории дистанционного зондирования Земли СахГУ и РАН, под руководством профессора, доктора технических наук Владимира Михайловича Пищальника. В сферу научных интересов входит разработка программного обеспечения и анализ больших данных. В настоящее время ведет исследования на тему применения методов и алгоритмов машинного обучения для автоматизации обработки данных дистанционного зондирования Земли.

УДК 004.9

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.067-071

Content is available under Creative Commons Attribution

License 4.0 International (CC BY 4.0)

НАУЧНАЯ СМЕНА

## Алгоритм обработки площадей льда по данным дистанционного зондирования Земли (на примере данных MASIE-NH)

© 2021 В. С. Никонов

Сахалинский государственный университет, Технический нефтегазовый институт, Южно-Сахалинск, Россия E-mail: vasilivni@yandex.ru

**Резюме.** Для автоматизации процесса обработки больших массивов данных, получаемых на основе дистанционного зондирования Земли, автором был разработан алгоритм и реализован в виде программы «M-Processor» на языке программирования Python, с использованием модулей программного обеспечения ArcGIS Desktop 10.2, что позволяет проводить сложные вычисления без затрат времени на их программирование и уменьшает количество манипуляций для расчета отдельных искомых характеристик. Проверка работоспособности алгоритма осуществлялась на примере расчета численных характеристик площади льда в Охотском море по данным мультисенсорной съемочной системы MASIE-NH с пространственным разрешением 1 и 4 км и маски районирования ледяного покрова.

Ключевые слова: морской лед, дистанционное зондирование Земли, геоинформационные системы, программное обеспечение, мультисенсорная съемочная система MASIE-NH

# An algorithm for processing ice areas by Earth remote sensing data (by the example of MASIE-NH data)

Vasily S. Nikonov

Sakhalin State University, Technical Oil and Gas Institute, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia E-mail: vasiliyni@yandex.ru

**Abstract.** An algorithm was developed to automate processing of large datasets of Earth remote sensing. The algorithm was developed and implemented in the form of an M-Processor program in the Python programming language using the modules of the ArcGIS Desktop 10.2 software, which allows complex calculations without spending additional time on programming and reduces the number of manipulations for

calculating separate desired characteristics. The implementation of the developed algorithm is considered on the example of ice data processing for the Sea of Okhotsk according to the data of the Multisensor Analyzed Sea Ice Extent – Northern Hemisphere (MASIE-NH) with a spatial resolution of 1 and 4 km and an ice-cover zoning mask.

**Keyword:** sea ice, Earth remote sensing, geographic information systems, software, Multisensor Analyzed Sea Ice Extent – Northern Hemisphere

Для цитирования: Никонов В.С. Алгоритм обработки площадей льда по данным дистанционного зондирования Земли (на примере данных MASIE-NH). Геосистемы переходных зон, 2021, 5(1). 67–71. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.067-071

## Введение

В настоящее время спутниковая съемка Земли позволяет получать оперативную информацию о состоянии земной поверхности в режиме реального времени. Одним из источников данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является информация мультисенсорной съемочной системы MASIE-NH.

Анализ данной информации является важным для исследования ледового режима дальневосточных морей. В связи с развитием нефтегазовых проектов в шельфовой зоне о. Сахалин, а также северного морского пути, полученные результаты имеют большое практическое значение для прогнозирования возможного возникновения опасных явлений и дальнейшего обеспечения безопасного плавания в акватории Охотского моря в зимнее время года.

Научно-исследовательская лаборатория дистанционного зондирования Земли Сахалинского государственного университета и Российской академии наук имеет ежедневно пополняемый большой архив пространственных гидрометеорологических данных [Никулина и др., 2020]. Для автоматизации процесса обработки поступающей информации автором статьи был разработан алгоритм. Его реализация в виде программного обеспечения (ПО) позволяет получать искомые характеристики исследуемых областей за короткий промежуток времени, с минимальным количеством манипуляций.

Данное программное приложение, в отличие от предыдущих разработок [Шумилов и др., 2017], обеспечивает возможность об*For citation:* Nikonov V.S. An algorithm for processing ice areas by Earth remote sensing data (by the example of MASIE-NH data). *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, 5(1), pp. 67–71. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.067-071

рабатывать данные в пакетном режиме. При расчете площади учитывается географическая проекция данных.

В работе представлено краткое описание разработанного алгоритма для обработки данных дистанционного зондирования Земли, реализованного в виде программного обеспечения «M-Processor». Рассмотрена работа программы на примере вычисления площадей льда в Охотском море.

#### Материалы и методы исследования

Для расчета ледовых характеристик в работе использовались данные MASIE-NH<sup>1</sup>, отражающие местоположение льда в северном полушарии (рис. 1 а). Получаемые векторные данные, содержащие информацию о форме, размере и местоположении льда, представлены в формате shapefile. Численные характеристики площади льда разделены на два архива с пространственными разрешениями 4 и 1 км. Публикация архивов NSIDC происходит один раз в три дня в сети интернет.

Маска районирования ледяного покрова Охотского моря [Минервин и др., 2015], по которой проводились вычисления, представлена на рис. 1 b.

Для реализации алгоритма обработки площадей льда автором написана программа «M-Processor». При этом использованыя язык программирования Python<sup>2</sup> и программные модули ПО ArcGIS Desktop: встроенный интерпретатор языка Python, программные библиотеки ArcPy<sup>3</sup>, GDAL<sup>4</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Архив данных MASIE [Data archive of MASIE]. National Snow & Ice Data Centre.

URL: http://masie\_web.apps.nsidc.org/pub/DATASETS/NOAA/G02186/shapefiles/ (accessed 10.09.2020).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Документация языка программирования Python 2.x. Python Software Foundation [Python 2.x programming language documentation. Python Software Foundation]. URL: https://docs.python.org/2/ (accessed 10.09.2020).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Справочник по инструментам. ESRI ArcGIS [Tools reference book. ESRI ArcGIS].

URL: https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/tool-reference/main/arcgis-pro-tool-reference.htm (accessed 13.09.2020).

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Программная библиотека GDAL [GDAL programming library]. URL: https://gdal.org/ (accessed 12.09.2020).



**Рис. 1.** Входные данные для программы «M-Processor»: a) данные MASIE-NH, b) маска районирования. **Figure 1.** «M-Processor» input: a) MASIE-NH data, b) zoning mask.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма обработки спутниковых данных.

Figure 2. Flowchart of satellite data processing algorithm.

## Принцип работы программного алгоритма

Программный алгоритм работает по принципу вычисления площади пересечений двух групп многоугольников из набора входных данных. Выходными данными алгоритма является информация о вычисленных значениях параметров из атрибутов пересечений в каждом из полигонов, заданных файлом-маской. При этом процедура вычисления может быть задана произвольным образом, что позволяет использовать алгоритм при расчете различных характеристик на основе гидрометеорологических параметров.

Блок-схема алгоритма обработки спутниковых данных представлена на рис. 2. Она состоит из 6 основных шагов.

1. Инициализация переменных, создание временных каталогов. На этом шаге переменным присваиваются первоначальные значения: пути к файлам, значения для вычислений; создаются временные каталоги для хранения промежуточных результатов работы алгоритма.

2. Вычисление пересечения целевого файла с маской районирования. Выполняется операция пересечения между двумя наборами полигонов. Вычисляется геометрическое пересечение полигонов, заданных входными файлами. Результатом операции является упорядоченный набор данных, содержащий области пересечений.

3. Выбор проекции данных. Производится анализ выполнения условий на соответствие проекции.
4. *Расчет площади многоугольников*. Для этого вычисляем искомый атрибут каждого полигона из полученного на шаге 2 пересечения.

5. Анализ и вычисление суммы площадей полигонов. Суммируем вычисленные значения атрибутов пересечений данных файлов маски и входных данных по соответствующим районам.

6. Вывод результатов работы алгоритма. Значения приводятся к заранее заданному виду и выводятся во внешний файл.

# Особенности реализации алгоритма в ПО «M-Processor»

Для реализации вышеописанного алгоритма разработано программное приложение «M-Processor». Программа работает под управлением операционной системы Windows.

При запуске ПО «М-Processor» происходит инициализация значений переменных, создается временный каталог «temp» для хранения промежуточных результатов работы. Далее программа обращается к функции «arcpy. Intersect\_analysis» для вычисления геометрического пересечения векторных данных двух (или более) файлов и объединения таблицы атрибутов.

В ходе реализации ПО оказалось, что некоторые из входных файлов имеют поврежденную структуру, а это вызывает некорректное поведение «Intersect\_analysis» из библиотеки ArcPy. Для устранения данной проблемы был написан отдельный модуль, получивший название «Rebuild». Он осуществляет «пересборку» shapefile, копируя геометрию из входного файла в новый, и получает префикс к имени «rebuild», далее используется в качестве входного файла и переходит к шагу 2 описанного ранее алгоритма.

Вычисление площади полученных полигонов осуществляется с помощью функции «arcpy.Describe», результатом работы которой является программный объект, содержащий параметры полигонов в файле. Суммирование площадей происходит с применением механизма «курсора» - указателя на запись в таблице объектов shapefile. С помощью данной абстракции программа последовательно проходит по записям в таблице. Для хранения площади пересечений применяется стандартный тип данных «dict» (словарь, или ассоциативный массив) языка Python. В качестве ключей (индексов) выступают названия районов из файла-маски, которые требуют последующей сортировки для вывода конечных результатов.

Далее программа открывает файл (в режиме добавления) для вывода, путь к которому задает пользователь. В открытый файл записывается текстовая строка, которая содержит данные в формате сsv таблицы<sup>5</sup>. По завершении файл закрывается. Полученный файл содержит

				A1	~	Tx 2 • = C-B-	1			
M-Processor GUI	_		X		A	В	С	D	E	
				1	B-1	C-B-2	C-B-3	C-B-4	<u>Ю</u> -1а	Ю-1
d				2	50041,7774063	154,285498866	6141,63451784	43615,1219696	2410,317855	,4
Выбрать каталог				3	50041,7774063	154,285498866	6141,63451784	54625,1645818	2141,6097940	17
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				4	51407,9688509	1517,07603714	6141,63451784	62966,2429626	679,52723020	/6
Выбрать маску				5	51407,9688509	1517,07603714	6141,63451784	62966,2429626	679,52723020	.6
оборать маску			6	51407,9688509	1517,07603714	6141,63451784	62966,2429626	1876,34820	7	
D. Karaun V. and and D. (mariadata (1)an /	2015 /			/	53290,1110256	2873,12021374	2178,15018125	65823,031563	5579,5210001	4
выоранный каталог: D:/masiedata/1km/2015/unpack		8	60270 0E12024	7454 64400710	21/8,15018125	77029,3202303	9629,9035612	1		
Pulifinauuan uacirai Cu/MASIE processor/shapefile/Daŭouur		one chn		10	74405 2516684	0233 36178708	57/6 26708379	81832 0210801	4023 2430037	9
воранная маска: слимыс_ргосеззолларене/ наионир	JOBAHNE_OXOTCKOE_M	opersub		11	82596 5811129	11584 5628330	5746 26708379	58924 7426126	11638 035718	14 F
masie ice r00 v01 2015001 1km shn				12	84563,4448233	12990.693489	6608,91262565	60546.1382124	15083.711734	46 6
Indate_rec_roo_vor_zorboor_rkmanp				13	86452.8996804	13689,7065112	7643,45793232	66070.2382827	17780,806428	15 6
masie_ice_r00_v01_2015002_1km.shp				14	86452,8996804	13689,7065112	7643,45793232	66070,2382827	17780,806428	i5 (
masie ice r00 v01 2015003 1km.shn				15	93864,4997956	16868,0356797	7972,37788066	78592,7861939	22452,640640	1 6
				16	90542,4035967	17590,5116248	5554,98693381	87715,2734016	23458,22504	.4 6
masie_ice_r00_v01_2015004_1km.shp				17	90542,4035967	17590,5116248	5554,98693381	87715,2734016	24567,561825	,4 (
masie ice r00 v01 2015005 1km.shp				18	92998,6160382	18690,6081521	9141,07710118	105184,671601	28244,967868	.5 6
				19	95614,144/138	19638,0371183	11004,04/14/9	116851,633732	28244,967868	5 6
masie_ice_r00_v01_2015006_1km.shp				20	95614,1447138	19638,0371183	11004,04/14/9	124502,521659	28244,967868	5 0
masie ice r00 v01 2015007 1km.shp				21	102008 61252	19030,0371103	12205 0066924	124502,521659	20244,907000	5 6
				22	106201 511043	20070 1253593	12295,9066834	141875 198325	28217,032731	5 6
masie_ice_r00_v01_2015008_1km.shp				24	103871.805863	20224.5594427	12478,9411882	148399.980213	28231.038998	17
masie ice r00 v01 2015009 1km.shp				25	105935.206491	20633.6575827	14984,8549581	152793,928322	28231,038998	J7
				26	110902,288291	20927,2089499	24954,4674866	152978,788268	28231,038998	17
masie_ice_r00_v01_2015010_1km.snp				27	113276,39515	20572,0748239	29626,7098096	153286,990799	28231,038998	s7
masie ice r00 v01 2015011 1km.shp				28	115420,295677	21538,4786868	36309,935147	154196,892887	28231,038998	7
				29	113991,292437	25643,2960661	36309,935147	152193,767836	28231,038998	7
masie_ice_ruu_vu1_2015012_1km.snp				30	118747,571117	29506,367994	35757,5980863	160731,214623	28231,038998	7
masie ice r00 v01 2015013 1km.shp				31	11/940,536931	29522,708245	29534,5205095	159961,35711	28231,038998	1
				32	118338,506007	24892,9138043	29657,019296	162676,046993	28231,038998	1
masie_ice_rou_vu1_2013014_1km.shp				33	110070 610729	24092,9138043	20090,5573063	170041 106169	20231,038998	17
masie ice r00 v01 2015015 1km.shp				25	120610 573262	30432,765919	27551 8442304	170207 042358	28231 038008	17
				36	123075 625922	31403 2914672	28323 2730327	170818 94392	28231 038998	17
Начать обработку				37	123075 625922	31403 2914672	28323 2730327	171240 132072	28231 038998	17
Пачата соразотку				<	11111.0.020022			2122 10,202072		

**Рис. 3.** Обработка данных в ПО «M-Processor»: a) окно программы, b) фрагмент таблицы с полученными результатами. **Figure 3.** Data processing by means of the «M-Processor»: a) program window, b) part of the table with the obtained results.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Common Format and MIME Type for Comma-Separated Values (CSV) Files. The Internet Society. URL: https://tools.ietf.org/html/rfc4180 (accessed 10.09.2020).

информацию о площади пересечений с разбиением на районы из файла-маски (рис. 3).

Программа была использована для обработки массива информации из архива MASIE-NH с 2006 по 2020 г. Время выполнения программы при обработке данных за один календарный год (365 файлов) составляет около 5 мин. Для сравнения, обработка подобного объема информации в предыдущей разработке [Шумилов и др., 2017] занимает порядка 1 ч.

При этом приложение обеспечивает высокий уровень автоматизации обработки информации. Пользователю необходимо лишь указать для работы программы каталог с данными и маску районирования. При этом возможно использовать программу для любых векторных данных в формате shapefile.

После обработки данных с помощью подготовленных масок районирования были получены результаты по Берингову, Охотскому и Японскому морям. Для дальнейшей автоматизации процесса обработки был создан алгоритм и написана вспомогательная программа «M-Download», предназначенная для получения новых данных MASIE-NH и последующей обработки их с помощью «M-Processor».

# Выводы

Разработанный алгоритм, реализованный в виде программного приложения «M-Processor», дает возможность рассчитывать площади ледяного покрова замерзающих морей по ежедневным данным дистанционного зондирования Земли. Расчет площади производится с учетом географической проекции входных данных, что дает более точные результаты вычислений.

С помощью программного приложения обработан архив данных MASIE-NH с 2006 по 2020 г. по Берингову, Охотскому и Японскому морям, что позволило пополнить новыми данными архив научно-исследовательской лаборатории дистанционного зондирования Земли СахГУ и РАН.

Выходные файлы с данными поддерживаются всеми табличными процессорами для визуализации, дальнейшей обработки и анализа.

# Список литературы

1. Никулина И.В., Никонова Е.В., Романюк В.А., Дорофеева Д.В. **2020.** Организация хранения и обработки пространственных гидрометеорологических данных на основе веб-геоинформационных платформ. В кн.: Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы III Всерос. науч.-практ. конф., Иркутск, ИГУ, 25–27 ноября 2020 г. Иркутск: ИГУ, с. 360–365.

2. Минервин И.Г., Романюк В.А., Пищальник В.М., Трусков П.А., Покрашенко С.А. **2015.** Районирование ледяного покрова Охотского и Японского морей. *Вестник Российской академии наук*, 85(1): 24–32.

3. Шумилов И.В., Пищальник В.М., Минервин И.Г. **2017.** О новой версии программного комплекса «Лед». *Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГис»*. М.: Изд-во Московского ун-та, 23: 250–256. https://doi.org/10.24057/2414-9179-2017-2-23-250-256

# References

1. Nikulina I.V., Nikonova E.V., Romanyk V.A., Dorofeeva D.V. **2020.** Organization of storage and processing of spatial hydrometeorological data based on web geoinformation platforms. In: *Current trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia: Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference, Irkutsk, November 25–27, 2020.* Irkutsk: IGU Publ., p. 360–365. (In Russ.).

2. Minervin I.G., Romanyuk V.A., Pishchalnik V.M., Truskov P.A., Pokrashenko S.A. **2015.** Zoning of the ice cover of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* = *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 85: 132–139.

3. Shumilov I.V, Pispchalnik V.M., Minervin I.G. **2017.** About new version of the "Ice" software package. *Materials of the International conference "InterCarto. InterGis"*, Moscow: Moscow University Publ., 23: 250–256. (In Russ.). https://doi.org/10.24057/2414-9179-2017-2-23-250-256

# Об авторе

НИКОНОВ Василий Сергеевич, студент 2 курса направления подготовки «Экология и природопользование» (магистратура), научно-исследовательская лаборатория дистанционного зондирования Земли Сахалинского государственного университета и Российской академии наук, Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, vasiliyni@yandex.ru

# **About Author**

NIKONOV Vasily S., 2nd year Student of the specialty "Ecology and nature management" (master's program), Research laboratory of remote sensing of the Earth of Sakhalin State University and Russian Academy of Sciences, Technical Oil and Gas Institute, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, vasiliyni@yandex.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)

# Третья Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Нефтегазовый комплекс: проблемы и решения» прошла в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, со 2 по 4 декабря 2020 года

Обменяться с коллегами мнением по актуальным проблемам нефтегазового комплекса собрались более 70 ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Российская Федерация была представлена исследователями из Москвы, Новосибирска, Томска, Костромы, Южно-Сахалинска, Петропавловска-Камчатского, зарубежные участники – коллегами из Ирака. Обсуждение заявленных проблем проходило в режиме видеоконференции, как многие общественные мероприятия последнего года.

Конференция была задумана как мероприятие, сопровождающее ежегодный деловой и промышленный форум «Нефть и газ Сахалина», проводимый под эгидой правительства Сахалинской области. В этом году мероприятие повысило статус до Дальневосточного энергетического форума.

Первая и вторая конференции, проведенные в дни работы форума в сентябре 2018 и 2019 гг., позволили продемонстрировать работы сахалинских ученых представителям нефтегазовых компаний.

На конференции 2020 г. обсуждались вопросы геодезического обеспечения хозяйственной деятельности в местах разработки месторождений углеводородов, возможности космического и наземного мониторинга природных и техногенных процессов в целях экологического контроля. В сообщениях содержались также новые материалы о геологическом строении месторождений нефти и газа, важные для нормальной эксплуатации объектов нефтегазового комплекса. Большой интерес вызвали доклады по социально-экономическим и геоэкологическим проблемам.

Участники собрания одобрили все направления исследований, отметили важность учета региональных геологических особенностей в проектно-изыскательских работах для обустройства новых месторождений углеводородов на Сахалине.

Доклады будут напечатаны в сборнике материалов конференции. Ряд докладов рекомендовано опубликовать в рецензируемом научном журнале.

В данном выпуске печатаются статьи, подготовленные на основе докладов на 3-й конференции «Нефтегазовый комплекс: проблемы и решения» и соответствующие тематике журнала «Геосистемы переходных зон»:

В.И. Бондаренко, В.А. Рашидов. Подводная газо-гидротермальная активность в пределах Курильской островной дуги.

И.П. Дудченко, Д.В. Костылев, С.А. Гуляков, Н.С. Стовбун. Геофизический генератор импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр. Журнал также рад представить научному сообществу работы начинающих исследователей – студентов-магистрантов 2 курса Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета: О.А. Кораблев. О новом предикторе, влияющем на ледообразование в Охотском море, В.С. Никонов. Алгоритм обработки площадей льда по данным дистанционного зондирования Земли (на примере MASIE-NH).

# Книги Books

Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Кузиков С.И. Вычислительные технологии в сейсмологических исследованиях (на примере КNET, Северный Тянь-Шань): монография / редакторы: д-рфиз.-мат. н. М.В. Родкин, д-р физ.-мат. н. Ю.Л. Ребецкий; рец.: д-р физ.-мат. н. А.Д. Завьялов, д-р физ.-мат. н. И.Н. Соколова. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2020. – 358 с., библиогр. 435 назв. – Прил.: 1 электрон. опт. диск (CD).

ISBN 978-5-6040621-6-6

https://dx.doi.org/10.30730/978-5-6040621-6-6.2020-2

В монографии авторы из Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке и Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук обобщили результаты многолетних исследований, полученные по данным сейсмологической сети KNET, установленной в 1991 г. в Северном Тянь-Шане. Применение различных инструментов к сейсмическим данным позволило решить сейсмологические задачи, такие как оценка кинематических и динамических параметров землетрясений, определение параметров напряжен-

и динамических параметров землетрясении, определение параметров напряженно-деформированного состояния земной коры. Представлены новые результаты, в деталях описывающие определение различных показателей сейсмичности на территории Бишкекского геодинамического полигона, Северный Тянь-Шань.

Книга будет полезной для сейсмологов и геофизиков, а также молодых исследователей и аспирантов, работающих в области наук о Земле.

К книге прилагается CD с электронной версией печатного материала в формате PDF, а также каталога фокальных механизмов землетрясений Северного Тянь-Шаня (на территории БГП) в формате Excel. Дополнительные материалы, размещенные на электрон. опт. диске, доступны на сайте ИМГиГ ДВО РАН http://www.imgg.ru/ru в форматах Excel и PDF.

Для контактов: Сычева Наиля Абдулловна, e-mail: ivtran@mail.ru

*Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Kuzikov S.I.* Computational technologies in seismological research (on the example of KNET, Northern Tian Shan): monograph / Eds M.V. Rodkin, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Yu.L. Rebetsky, Dr. Sci. (Phys. and Math.). – Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 2020. – 358 p., bibliography 435. – Suppl.: 1 electronic optical disks (CD).

ISBN 978-5-6040621-6-6

https://dx.doi.org/10.30730/978-5-6040621-6-6.2020-2

The results of long-term seismological investigations have been represented in the

manuscript, which were obtained by the data of the seismological network KNET established in 1991 in Northern Tien Shan. Use of various tools for processing of the obtained seismic data allowed solving a number of seismological problems, such as assessment of kinematic and dynamic parameters of earthquakes, determination of parameters of the stress – strained state of the of the crust. The new results describing in details the determinations of various indicators of seismicity in the territory of the Bishkek geodynamic test site, Northern Tien Shan have been presented.

The book will be useful to the young researchers and graduate students working in the field of Earth Sciences.

The CD attached to this book represents the electronic version of the content and the catalog of earthquakes focal mechanisms of North Tien Shan (BGP territory). Additional materials are located on CD (book supplement), also available on the website http://www.imgg.ru/ru as Excel format and in PDF format.

Contact: Sycheva Nailia Абдулловна, e-mail: ivtran@mail.ru

# Исправления

Авторы статьи «О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии» (2020, № 4, с. 393–446. (На рус. и англ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446) приносят читателю извинения в связи с допущенными в ней ошибками:

Страница, колонка, строка	Напечатано	Следует читать
С. 403 и 426, слева, формула (26)	$e_{\rm PR} = 5.6 \cdot 10^{-7} \cdot M_0^{0.16}$	$e_{\rm PR} = 1.08 \cdot 10^{-16} \cdot M_0^{0.88}$
<ul> <li>С. 403 и 426, слева, ссылка</li> <li>в подписи к рис. 4;</li> <li>С. 404 и 427, табл. 1, столбец 2</li> </ul>	[Беседина и др., 2015] [Besedina et al., 2015]	[Адушкин и др., 2010; Беседина и др., 2015] [Adushkin et al., 2010; Besedina et al., 2015]
С. 404 и 427, табл. 1, столбец 4, 2-я строка снизу	$5.6 \cdot 10^{-7} \cdot M_0^{0.16}$	$1.08 \cdot 10^{-16} \cdot M_0^{0.88}$
С. 413 и 435	Пропущена поз. 1 в списке литературы и в References	<ol> <li>Адушкин А.В., Беляева Л.И., Гончаров А.И., Куликов В.И. 2010. Геодинамический мониторинг при разработке угольного месторож- дения Воркуты. Горный информационно-аналитический бюллетень, 10: 233–243.</li> <li>Adushkin A.V., Belyaeva L.I., Goncharov A.I., Kulikov V.I. 2010. Geodinamicheskiy monitoring pri razrabotke ugol'nogo mestorozhdeniya Vorkuty. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten', 10: 233–243.</li> </ol>





# Правила оформления и публикации рукописей в журнале «Геосистемы переходных зон»

E-mail: gtrz-journal@mail.ru

# Список научных специальностей

и соответствующих им отраслей науки, по которым журнал «Геосистемы переходных зон» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук

Шифр	Наименование группы научных специальностей, наименование научной специальности	Наименование отраслей науки, по которым присуждается ученая степень
25.00.00	Науки о Земле	
25.00.01	Общая и региональная геология	Геолого-минералогические
25.00.03	Геотектоника и геодинамика	Геолого-минералогические
25.00.04	Петрология, вулканология	Геолого-минералогические
25.00.10	Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых	Геолого-минералогические Физико-математические
25.00.25	Геоморфология и эволюционная география	Географические
25.00.28	Океанология	Географические Геолого-минералогические Физико-математические
25.00.35	Геоинформатика	Геолого-минералогические Физико-математические
25.00.36	Геоэкология	Геолого-минералогические Географические
01.02.00	Механика	
01.02.04	Механика деформируемого твердого тела	Физико-математические Технические

График выхода журнала: № 1 – март; № 2 – июнь; № 3 – сентябрь; № 4 – декабрь.

Журнал публикует оригинальные и обзорные научные статьи, краткие научные сообщения Short Report, письма с дискуссией по статьям, рецензии на научные издания, а также сообщения о конференциях, семинарах, экспедициях, об изданной научной литературе.

Научным статьям и сообщениям присваивается идентификатор CrossRef – DOI (Digital Object Identification).

Журнал «Геосистемы переходных зон» имеет DOI: https://doi.org/10.30730/gtrz .

Рукописи принимаются в электронной форме в течение года по e-mail: gtrz-journal@mail.ru

Заказные и ценные письма и бандероли редакция не получает.

В журнале принято *двустороннее слепое рецензирование* (подробнее о порядке рецензирования см. на сайте журнала). В качестве рецензентов выступают известные специалисты по данному направлению, имеющие публикации по тематике статьи и необходимый уровень цитирования.

Выбор рецензента – прерогатива редколлегии, но авторы могут указать в сопроводительном письме 4–6 потенциальных рецензентов своей работы (минимум из 2 разных регионов или разных стран; эксперты в данной области; отсутствие сотрудничества, в том числе соавторства за последние 3 года; не члены редколлегии журнала). Авторы также имеют право указать имена тех специалистов, кому, по их мнению, не следует отправлять работу в связи с возможным конфликтом интересов. Данная информация является строго конфиденциальной и принимается во внимание при организации рецензирования, кроме случаев, когда у редактора есть более веские основания, чем у автора.

Если статья не отвечает тематике журнала, не содержит предмета научного исследования, не соответствует этическим требованиям, дублирует опубликованные материалы, логически не выстроена, изложена неудобоваримым языком и т.п., редакция может аргументированно отказать автору в публикации на основании первичного скрининга, до проведения рецензирования. Решение о публикации принимает редакционная коллегия в течение 3–4 месяцев со дня получения материалов на основании минимум 2 рецензий. Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Статью с копиями рецензий и редакционными замечаниями высылают автору. Возвращение рукописи на доработку еще не означает принятия ее к публикации. Вся дальнейшая работа над статьей идет в редакционном файле, в котором автор дорабатывает текст и присылает его вместе с ответным письмом. Ответное письмо следует писать в файле с рецензией или редакционным заключением. В нем нужно:

- ответить на каждый комментарий рецензентов;
- указать конкретно, какие именно изменения внесены в статью;
- написать убедительное, вежливое возражение, если, по мнению автора, рецензент неправ.
- поблагодарить рецензента за полезные замечания и конструктивную критику.

Редколлегия на основании рецензий и ответной реакции автора определяет дальнейшую судьбу рукописи.

Принятую к печати статью снова читает редактор и согласовывает с автором правки, связанные с содержанием. Готовый к верстке файл следует внимательно вычитать, поскольку в верстке допустима только мелкая правка.

Работу включают в план номера. Содержание номера утверждает ответственный за номер и/или главный редактор, за которым остается право отклонить статью по серьезным на то основаниям (конфликт интересов, недостаточный уровень новизны исследования и т.п.). В случае принятия статьи к публикации автору сообщают, в каком номере она будет опубликована.

Авторы статей несут ответственность за содержание статей и факт их публикации, о чем подписывают авторское заявление.

Редакция вправе изъять уже опубликованную статью, если выяснится, что в процессе ее публикации были нарушены чьи-либо права или общепринятые нормы научной этики. О факте изъятия статьи редакция сообщает ее автору, специалистам, давшим рекомендацию или рецензию, организации, где работа выполнялась, и в базу научного цитирования, в которой журнал индексируется.

Публикация статей бесплатна для авторов. По запросу авторов редакция после выхода журнала в свет высылает pdf-файл с опубликованной статьей. Печатные экземпляры издания можно приобрести в редакции или оформив подписку по каталогу «Пресса России» (индекс 80882). Подписавшиеся на журнал, сделав своевременно по электронной почте запрос в редакцию, получат бесплатно pdf-файл с электронной версией журнала в течение недели после подписания его в печать.

# Структура основного файла (см. файл Образец оформления статьи на сайте журнала)

Тематическая рубрика из приведенного выше списка специальностей.

**Индекс УДК** по таблицам Универсальной десятичной классификации, имеющимся в библиотеках, или с помощью интернет-ресурса http://teacode.com/online/udc/

Заглавие. 10–12 слов. Короткое, емкое. По возможности избегайте общих слов, научных жаргонизмов и аббревиатур. В идеале все слова названия могут служить ключевыми при научном поиске.

Инициалы и фамилии авторов (отметить звездочкой автора для контактов и указать e-mail для переписки).

**Полные названия учреждений** (как они значатся в Уставе), к которым аффилированы авторы, и их местонахождение (город, страна).

**Реферат** (резюме, аннотация) – **Abstract**. Объем 200–300 слов. Без прочтения всей статьи дает четкое представление о цели статьи, ее научной новизне и достигнутых результатах. Поэтому в нем в лаконичной форме должны быть четко обозначены проблема, обоснование цели, материалы и методы, результаты исследования и их интерпретация, выводы.

Для иностранных ученых абстракт зачастую является единственным источником информации о содержании русскоязычной статьи и изложенных в ней результатах исследования.

Избегайте пассивных глагольных форм (*The study tested, но не It was tested in this study. Мы доказали звучит лучше, чем Нами доказано*). Классическое безличное *было продемонстрировано, описано* как бы переводит на второй план личную ответственность.

*Ключевые слова* (не более 10, допустимы словосочетания из двух слов) в оптимальном варианте отражают: предмет исследования, методы, объект, специфику данной работы. Используются для индексирования и поиска. Призваны облегчить нахождение статьи в базах данных.

Благодарности и сведения о финансовой поддержке работы (с номерами грантов в скобках).

**Текст статьи** с вставленными в текст иллюстрациями и таблицами в программе Word любой версии без использования макросов. Если в статье есть формулы, символы и т.п., продублируйте файл в pdf.

#### Список цитируемых источников.

**Сведения о всех авторах** (в конце статьи): фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность, лаборатория, кафедра или отдел с полным и сокращенным названием (аббревиатурой) учреждения (как в Уставе), ORCID (Open Researcher and Contributor ID), почтовый адрес, e-mail; телефон контактного автора.

#### Отдельными файлами прилагаются:

1) Авторское заявление (форму скачать на сайте журнала);

2) скан-копия Экспертного заключения (по форме, принятой в организации автора) о возможности опубликования в открытой печати;

3) графические материалы;

4) в случае необходимости разрешения на публикацию отдельных материалов (см. файл О разрешениях на использование материалов третьих лиц на сайте журнала).

#### На английском языке в файле со статьей дублируются:

- заглавие,
- имена и фамилии авторов,
- наименования организаций (как они значатся в Уставе),
- реферат и ключевые слова,
- подрисуночные подписи,
- заголовки таблиц,
- сведения о финансовой поддержке работы и благодарности,
- полные сведения о всех авторах.

Транслитерация элементов (при необходимости) производится в системе BGN – с помощью сайта <u>http://translit.ru/</u>

Схему оформления статьи и рекомендуемый перевод званий и должностей см. на сайте журнала в файле «Образец оформления статьи».

Для лучшего восприятия и цитирования статьи желательно придерживаться четкой структуры, учитывая рекомендации АНРИ (Ассоциации научных редакторов и издателей), а также рекомендации EASE (European Association of Science Editors) для авторов и переводчиков научных статей, которые должны быть опубликованы на английском языке.

#### Введение

Осветите следующие вопросы:

- Современные взгляды на проблему.
- Что было сделано ранее (обзор литературы; укажите оригинальные и важные работы, в том числе последние обзорные статьи). Избегайте ссылок на устаревшие результаты. Выделите нерешенные вопросы в пределах общей проблемы.
- Какова ваша гипотеза, каковы ваши цели (постановка задачи с упором на новизну, четко сформулируйте цель статьи).
- Что было проделано вами.

# Материал (объект) и методы исследования

- Опишите, как вы изучали поставленную проблему.
- Не описывайте процедуры и методы, данные о которых публиковались ранее.
- Укажите применяемое оборудование и опишите использованные материалы.

## Результаты исследования или Эксперимент (исследование, моделирование и т.п.)

- Систематизированный авторский аналитический и статистический материал (ключевое слово здесь систематизированный).
- Таблицы, графики и текст не должны дублировать друг друга.
- Рисунки и таблицы это история исследования. Они должны быть понятными и без текста, таблицы не перегруженными, всё подписано и на своем месте. Не забудьте привести подрисуночные подписи и заголовки таблиц помимо русского на английском языке.

#### Обсуждение результатов – очень важный раздел.

- Желательно сравнить результаты с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Самый очевидный способ поднять цитирование – это не только представить свои данные, но и сопоставить их с мировыми или региональными аналогами. Модель и выводы должны быть универсальны с точки зрения восприятия учеными не только вашей специальности. Если модель хорошая, если выводы сделаны и обоснованы правильно, то они должны быть понятны любому.
- Не стоит игнорировать работы, чьи результаты противоречат вашим вступите с ними в конструктивную дискуссию и убедите читателя в своей правоте.
- Чтобы предвосхитить возможные замечания рецензентов, обсудите ограничения ваших результатов что не удалось сделать и почему.

При необходимости введите тематические подзаголовки, объедините некоторые разделы (Введение и методы, Результаты и обсуждение, Обсуждение и заключение, и т.п.).

Выводы и Заключение – это не одно и то же, но их, как правило, объединяют под заголовком Заключение. Выводы лаконично излагают главные результаты, желательно фразами, отличающимися от высказанных

*Важно:* выводы должны четко коррелировать с формулировкой цели и задач работы, с результатами и содержанием аннотации.

Заключение

• Дает ответ на вопросы, что нового статья добавляет к уже опубликованным результатам и насколько работа позволяет продвинуться вперед в данной области знаний.

• Предлагает обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивает их практическую значимость, определяет направления для дальнейшего исследования в этой области и, желательно, прогноз развития рассмотренных вопросов.

#### Список литературы

Обязательны работы последних 5–10 лет. Не забывайте о работах иностранных коллег. В обзорных статьях наряду с современными, новейшими источниками укажите те, в которых исследуемая тематика была затронута или разработана впервые. Минимизируйте ссылки на учебные пособия, справочники, энциклопедии и т.п., которые не могут быть серьезной основой для научного исследования. Цитирование собственных работ не должно превышать 20 % от общего числа в списке.

### Данные

В этом разделе автор может разместить дополнительную информацию – данные экспериментов, вспомогательных методов исследования и тому подобные данные, поддерживающие выводы в статье. По существу, это приложение к статье. Такая информация также может быть размещена в качестве дополнительного материала к статье в электронной версии журнала.

Обширная база данных вкупе с методами их обработки, имеющая самостоятельную научную ценность, может быть опубликована в виде отдельной работы со ссылкой на собственно научную статью, в которой обсуждаются результаты анализа этих данных.

Если результаты эксперимента еще не осмыслены на уровне обобщения, достойном статьи, но представляются важными для решения научной проблемы, оформите их в виде **краткого сообщения** (постановка задачи, экспериментальный материал, выводы, небольшой список литературы).

# Что обычно смотрят рецензенты?

- Аннотацию-реферат прежде всего.
- Рисунки. Рецензенты с большим стажем выявили корреляцию: если рисунки проблемные, то статья скорее всего тоже вызовет вопросы.
- Затем рецензенты проверят:
   насколько точно название отражает содержание статьи:
- четко ли коррелируют выводы с формулировкой цели и задач работы, изложением результатов и содержанием реферата;
- достаточно ли выводы аргументированы представленным материалом;
- качество списка литературы: представительный список литературы демонстрирует профессиональный кругозор авторов и научный уровень исследования.

### Основные требования к оформлению статьи

Формат листа	A4
Поля	по 1,5 см со всех сторон
Шрифты	Times New Roman – для текста, Symbol – для греческих букв
Размер шрифта	12–13
Десятичный символ	точка, а не запятая
Межстрочный интервал	1,15
Выравнивание текста	по левому краю
Автоматическая расстановка переносов	нет

Все текстовые элементы (в том числе в библиографических списках), кроме случаев, подчиняющихся общепринятым орфографическим правилам, набираются строчными (не прописными!) буквами. Используются «кавычки», но не "кавычки". Даты в тексте в форме «число.месяц.год» набиваются следующим образом: 02.05.1991.

*Точка не ставится* после: УДК, заглавия статьи, авторов, адресов, заголовков и подзаголовков, названий таблиц, размерностей (с – секунда, г – грамм, мин – минута, ч – час, сут – сутки (но мес. – месяц, г. – год), млн – миллион, млрд и т.п.), в подстрочных индексах (Т<sub>пп</sub> – температура плавления).

Пробелом отделяются инициалы от фамилии (*А.А. Иванов*); размерность от цифры: 100 кПа, 77 К, 50 %, 10 ‰, кроме градусов: 90° (но 20 °C); порядковые номера от любого обозначения: рис. 1, fig. 1, табл. 2; знак широты и долготы в географических координатах: 56.5° N; 85.0° Е.

Между двумя цифрами ставится не дефис, а тире (одновременным нажатием Ctrl и тире на правой цифровой панели) без пробелов с обеих сторон, например: 1984–1991 гг.; 6–8 м.

**Математические формулы**, оформляемые отдельной строкой и содержащие знаки, отсутствующие в Times New Roman, должны набираться **целиком в редакторе, совместимом с** Microsoft Office.

Формулы и символы, которые можно внести в текст, не используя специальный редактор, набираются латиницей и/или через опцию Вставка – Символ. Нежелательно использовать символы в рефератах на русском и английском языках – в интернет-сети символы не отображаются.

**Таблицы** должны быть озаглавлены, в них не должно быть пустых ячеек. Прочерки обязательно поясняются в примечании. При создании таблиц используйте возможности Word (Вставка – Таблица – Добавить таблицу).

**Иллюстративные материалы** размещаются по тексту статьи (через опцию Вставка – Рисунок – Обтекание – В тексте; рисунки к тексту не привязывайте и не размещайте их вместе с подписями в форме таблиц!). Если Word не дает иной возможности показать желаемое для вас расположение рисунков и их частей, сделайте макет и представьте его в PDF.

Для верстки статьи рисунки представляются в виде отдельных файлов в той версии, в которой они создавались.

Форматы: для фото, рисунков – jpg (300–600 dpi); для графиков, диаграмм, схем и т.п. – tiff, xls (Excel), cdr (CorelDraw) версий 12.0(2004) или X4(2008).

Размеры рисунков, шрифтов надписей на них должны быть выбраны с учетом уменьшения их в соответствии с размерами полосы (17 × 23 см) и колонки (8 × 23 см).

Надписи на осях начинаются с прописной буквы: Глубина, м. В подрисуночных подписях сначала идет общий заголовок к рисунку, а затем расшифровка частей и легенды. Литеры для обозначения частей рисунка ставятся латиницей в скобках: (a), (b) и т.д. На рисунках в десятичных дробях ставьте точки, а не запятые.

Поскольку редакция планирует постепенно перейти к выпуску параллельных версий на русском и английском языках, к русскоязычным статьям крайне желательно помимо подписей представлять в двух вариантах и рисунки: 1) с надписями и символами на русском языке и 2) с надписями и символами на английском языке. Тем более что социальная сеть ученых ResearchGate зачастую предлагает автору русскоязычной статьи добавить отдельно рисунки с надписями на английском языке и комментариями или сопутствующую информацию для ознакомления англоязычного сообщества.

**Объем каждого графического файла – не более 10 Мб.** Цветные рисунки принимаются в том случае, когда их нельзя без ущерба для смысла перевести в черно-белые.

В тексте должны быть ссылки на все рисунки.

Величины и единицы измерения должны соответствовать стандартным обозначениям согласно Международной системе единиц СИ.

Список литературы (см. на сайте Оформление ссылок в списке литературы) помещается после основного текста статьи, он составляется в алфавитном порядке.

В пределах работ одного автора вначале идут работы одного автора, потом этого автора с одним соавтором, затем этого автора с двумя и более соавторами – в каждой группе в хронологическом по возрастанию порядке. Авторы числом до 10 приводятся все.

Курсивом выделяется при описании моноизданий название работы, а в аналитическом описании – название источника.

Списки литературы с учетом требований международных систем цитирования должны быть приспособлены для автоматической обработки с целью идентификации ссылок. Русскоязычные (на кириллице) ссылки машины не считывают, поэтому журнал помещает библиографические списки не только на языке оригинала, но и в латинице.

Редакция просит авторов не переводить самостоятельно на английский язык названия статей, монографий, сборников статей, конференций и т.п. Автор должен только привести наряду с русскими описания английских версий (если они опубликованы) или библиографические сведения на английском языке, имеющиеся в оригинале (Ф.И.О. авторов на латинице, англоязычное название работы, название источника (журнала) в транслитерации и параллельное англоязычное, если оно есть в оригинале или на сайте), с указанием после выходных данных языка публикации (In Russ.).

Чтобы не терять ссылки в базах, автор при подаче рукописи в редакцию должен настаивать на идентичной, однажды избранной им форме транслитерации своей фамилии. Однако фамилии и инициалы авторов на латинице следует приводить так, как они даны в оригинальной публикации. Правила библиографического описания одинаковы для русскоязычных и англоязычных источников. В журнале принят стиль библиографических описаний, близкий к стилю Chicago (с элементами стиля APA – American Psychological Association).

Обязательные элементы: авторы (редакторы), год издания, полное наименование книги или статьи, место издания, издательство, название источника в полной форме, том, номер, количественная характеристика (для книги – общее число страниц, для статьи или главы – страницы, на которых она помещена, например: 5–10), идентификатор doi (если имеется) или унифицированный идентификатор ресурса URI (URL) и дата обращения.

На основе списка литературы, приведенного в рукописи, редакция составляет References. Неточность в библиографических описаниях приводит к потере ссылок в базах цитирования и поэтому недопустима. Подробнее об оформлении библиографических описаний в списке см. файл *Оформление ссылок в списке литературы* на сайте журнала.

#### В списке литературы

1) должны быть приведены DOI в формате <u>https://doi.org/</u> или полные интернет-адреса (URL) для ссылок там, где это возможно; описания английских версий (если они опубликованы) или библиографические сведения на английском языке, имеющиеся в оригинале (Ф.И.О. авторов на латинице, англоязычное название статьи и источника);

2) все источники должны легко обнаруживаться средствами поисковых систем (Google, Yandex и др.).

В тексте должны быть ссылки на все приведенные в списке источники.

Ссылки на литературу в тексте даются в квадратных скобках с указанием фамилии автора (или первого автора при трех и более соавторах), фамилий двух соавторов и года выпуска, например: [Петров, 2011; Olami et al., 1992; Левин, Носов, 2009]. В одинаковых ссылках на разные работы одного года и в их описаниях в списке при обозначении года ставятся латиницей литеры: [Сим и др., 2016 a, b].

В список литературы не включаются:

- учебники;
- статьи из ненаучных журналов;
- нормативные и законодательные акты;
- статистические сборники и архивы;
- электронные неопубликованные ресурсы (онлайн-статьи, газетные и любые новостные ресурсы, доклады и разные исследования на сайтах, сайты учреждений и организаций);
- диссертации;
- словари, энциклопедии, другие справочники;
- отчеты, записки, рапорты, протоколы.

Указанные источники оформляются в виде внутритекстовых ссылок в круглых скобках или в виде постраничных сносок внизу страницы.

# Примеры библиографических описаний в списке литературы

#### Монографическое издание

- 1. Грачев А.Ф. (ред.) **1998**. Новейшая тектоника Северной Евразии: Объясн. записка к карте новейшей тектоники Сев. Евразии м-ба 1:5 000 000. М.: ГЕОС, 147 с.
- 2. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А. **2014**. *Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин*. М.: Научный мир, 172 с
- IPCC: Climate Change 2013 The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1535 p. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/ (accessed 13.11.2019)
- 4. Max M.D. (ed.) **2000**. *Natural gas hydrate*. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Acad. Publ., 410 p. (Oceanic and Permafrost Environments; 5). https://doi.org/10.1007/978-94-011-4387-5

Статья (или монографическая работа) в периодическом издании

- 5. Blunden J., Arndt D.S. (eds) 2017. State of the Climate in 2016. Bull. of the American Meteorological Society, 98(8): Si–S277. https://doi.org/10.1175/2017BAMSStateoftheClimate.1
- Elliott S., Maltrud M., Reagan M., Moridis G., Cameron-Smith P. 2011. Marine methane cycle simulations for the period of early global warming. *J. of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G1): G01010, 13 p. https://doi.org/10.1029/2010jg001300
- 7. Pletchov P.Y., Gerya T.V. **1998**. Effect of H<sub>2</sub>O on plagioclase-melt equilibrium. *Experiment in Geosciences*, 7(2): 7–9. URL: http://library.iem.ac.ru/exper/v7\_2/khitar.html#pletchov (accessed 14.11.2019).

# Статья, опубликованная в русской и английской версиях журнала

8. Щербаков В.Д., Некрылов Н.А., Савостин Г.Г., Попов Д.В., Дирксен О.В. **2017**. Состав расплавных включений в минералах тефр почвенно-пирокластического чехла острова Симушир. Вестник Москов. ун-та, Серия 4, Геология, 6: 35–45. Shcherbakov V.D., Nekrylov N.A., Savostin G.G., Popov D.V., Dirksen O.V. 2018. The composition of melt inclusions in phenocrysts in tephra of the Simushir Island, Central Kuriles. *Moscow University Geology Bull.*, 73(1): 31–42. https://doi.org/10.3103/s014587521801009x

#### Статья с англоязычными метаданными, приведенными в источнике

 Рыбин А.В., Чибисова М.В., Смирнов С.З., Мартынов Ю.А., Дегтерев А.В. 2018. Петрохимические особенности вулканических комплексов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова). *Геосистемы переходных зон,* 2(4): 377–385. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.377-385
 Rybin A.V., Chibisova M.V., Smirnov S.Z., Martynov Yu.A., Degterev A.V. 2018. Petrochemical features of volcanic

complexes of Medvezh'ya caldera (Iturup Island, Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Tran*sition Zones, 2(4): 377–385. (In Russ.).

Статья в сборнике статей или материалов конференции, глава в монографии

- Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В. 2016. О возможной границе между Амурской и Охотской микроплитами на Сахалине. В кн.: Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы 4-й Тектонофиз. конф., 3–7 окт. 2016, Москва. М.: ИФЗ РАН, т. 1: 256–263.
- 11. Grebennikova T.A. **2011.** Diatom flora of lakes, ponds and streams of Kuril Islands. In: *Diatoms: Ecology and Life Cycle*. New York: Nova Publ., 93–124.
- Hinrichs K.U., Boetius A. 2002. The anaerobic oxidation of methane: new insights in microbial ecology and biogeochemistry. In: Wefer G., Billett D., Hebbeln D. et al. (eds) Ocean Margin Systems. Berlin, Heidelberg, Springer, 457–477.

#### Патент

13. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В., Фирстов П.П. 2014. Сигнализатор изменений главных компонент: пат. RU 141416. № 2013147112; заявл. 22.10.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.

#### Автореферат диссертации

 Бондаренко В.И. 1990. Строение подводных кальдер по данным сейсмоакустического профилирования (на примере Курильской островной дуги): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Москва, Геологический ин-т АН СССР.

#### Интернет-ресурс

- 15. Кондратьев В.Б. **2011**. Глобальная фармацевтическая промышленность = The global pharmaceutical industry. URL: http://perspektivy.info/rus/ekob/2011-07-18.html (дата обращения 23.06.2013).
- 16. NGDC: Tsunami Data and Information. URL: https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\_db.shtml (accessed 29.09.2019).

Составитель Низяева Галина Филипповна, кандидат филологических наук Подписной индекс 80882 Подписка на журнал «Геосистемы переходных зон» на 2021 год производится по объединенному каталогу «Пресса России»

Полнотекстовые варианты статей доступны на сайтах: журнала http://journal.imgg.ru;

научной электронной библиотеки (eLibrary) https://elibrary.ru/title\_about.asp?id=64191