

V ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ» г. Южно-Сахалинск, Сахалинская область 27-31 мая 2024 г.



Приглашаем ученых и специалистов, аспирантов и студентов принять участие в конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы», которая состоится 27–31 мая 2024 года в г. Южно-Сахалинск. В 2024 году отмечается 300 лет Российской академии наук, и мы надеемся, что эта конференция гармонично вольется в череду важнейших научных событий в России. Надеемся, что на полях нашего научного форума сможем достойно отметить это событие не только с нашими старыми друзьями, но и с теми учеными, которые еще не посещали 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.

СЕКЦИИ И ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

Исследования Земли против угроз природно-техногенных катастроф на территории Дальнего Востока и Восточной Сибири

- Геологическое строение земной коры и ее отдельных структурных единиц разного масштаба
- Основные этапы и стадии развития земной коры и верхней мантии Азиатско-Тихоокеанского региона
- Вещественный состав (литологический, минеральный, химический, элементный, изотопный) различных геологических сред и объектов
- Поиск и прогнозирование месторождений полезных ископаемых

Круглый стол Геофизический мониторинг и развитие методов прогноза землетрясений

Обсуждение вопросов прогноза землетрясений, наблюдательной сейсмологии, оценки сейсмической опасности, современных движений земной коры, геофизического мониторинга

Динамика моря, вопросы изменения климата

- Потоки вещества и энергии в гидросфере
- Генерации цунами, цунамиопасность
- Моделирование и прогнозы морских опасных явлений в океанах и морях
- Геолого-геоморфологическим аспектам стратегии освоения ресурсов морских побережий Дальнего Востока и восточного сектора Арктики

Живые системы и геологическая среда

- Влияние на живые организмы и экосистемы природного (вулканическая и поствулканическая активность, засуха, засоление, погодные и климатические аномалии и др.) и антропогенного стресса (нерациональное хозяйствование, рекреационная нагрузка)
- Анализ адаптивных стратегий живых организмов под давлением факторов окружающей среды
- Изучение биологического разнообразия и проблемы инвазий как маркеров благополучия окружающей среды, анализ состояния экосистем по данным аэрокосмических исследований Земли

В программе конференции планируются однодневные экскурсии, которые позволят познакомиться с историей и природой острова Сахалин. Более подробную информацию разместим во втором циркуляре.

К началу работы конференции будут изданы тезисы докладов. Объем тезисов не должен превышать одну страницу машинописного текста. Избранные доклады по решению организационного комитета конференции будут рекомендованы для публикации в журнале ИМГиГ ДВО РАН «**Геосистемы переходных зон**» (<http://journal.imgg.ru>), индексируемом РИНЦ и входящем в Перечень ВАК.

РЕГИСТРАЦИЯ УЧАСТНИКОВ

ЗАЯВКА оформляется онлайн на сайте конференции <http://geopronh.ru> или посредством отправки регистрационной формы по адресу geopronh2024@imgg.ru до **1 марта 2024 г.** Файл регистрационной формы прилагается к первому циркуляру конференции, а также размещен на ее официальной странице в сети интернет <http://geopronh.ru>. Образец оформления тезисов доклада приложен к информационному сообщению.

Оргвзнос 5000 руб. оплачивается при регистрации. Для аспирантов и молодых ученых в возрасте до 35 лет **3000 руб.** За счет оргвзноса обеспечивается оргнабор участника конференции и организация кофе-брейков. Информация о гостиницах г. Южно-Сахалинска будет дана во втором циркуляре. Программа конференции будет разослана участникам вместе с третьим циркуляром, а также размещена на сайте конференции.

АДРЕС ОРГКОМИТЕТА:

Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1 Б
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
Телефон/факс: 8 (4242) 79-15-17

Web-страница конференции:
<http://geopronh.ru>
E-mail: geopronh2024@imgg.ru

ОРГАНИЗАТОР	СО-ОРГАНИЗАТОРЫ		
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН	Питомник растений «Магнолия Парк»	Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН	Сахалинский государственный университет

ОСНОВНЫЕ ДАТЫ:

- до 1 ФЕВРАЛЯ 2024 г. – Второй циркуляр.
- до 1 МАРТА 2024 г. – Заявка на участие в конференции.
- до 1 АПРЕЛЯ 2024 г. – Представление тезисов докладов.
- до 15 АПРЕЛЯ 2024 г. – Третий циркуляр.

Научный журнал

Учредитель и издатель:

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Издаётся с января 2017 г.

Периодичность издания 4 раза в год

Scientific journal

Founder and Publisher:

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

Published since January 2017

Periodicity: Quarterly

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

The main objective of the journal is informing of scientific community, Russian and foreign, about the results of researches in geosystems of the Earth's transition zones and related problems of geophysics, geology, geodynamics, seismology, geoecology and other sciences.

Журнал:

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

1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (*геолого-минералогические*)

1.6.3. Петрология, вулканология (*геолого-минералогические*)

1.6.9. Геофизика (*геолого-минералогические; физико-математические*)

1.6.14. Геоморфология и палеогеография (*географические*)

1.6.17. Океанология (*географические; геолого-минералогические; физико-математические*)

1.6.20. Геоинформатика, картография (*физико-математические*)

1.6.21. Геоэкология (*географические; геолого-минералогические*)

1.5.15. Экология (*биологические*)

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела (*технические; физико-математические*)

- отнесен в Перечне ВАК к журналам II категории (K2).

The Journal is:

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

1.6.1. General and regional geology. Geotectonics and geodynamics (*Geology and Mineralogy*)

1.6.3. Petrology and volcanology (*Geology and Mineralogy*)

1.6.9. Geophysics (*Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics*)

1.6.14. Geomorphology and Paleogeography (*Geography*)

1.6.17. Oceanology (*Geography; Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics*)

1.6.20. Geoinformatics and cartography (*Physics and Mathematics*)

1.6.21. Geoecology (*Geography; Geology and Mineralogy*)

1.5.15. Ecology (*Biology*)

1.1.8. Mechanics of deformable solids (*Physics and Mathematics; Engineering*)

- it is assigned to the K2 category in the VAK list.

Адрес учредителя и издателя

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

Postal address

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

© ИМГиГ ДВО РАН, 2023

Редакционная коллегия*Главный редактор*

Завьялов Петр Олегович, член-корреспондент РАН, д-р геогр. наук, заместитель директора, руководитель лаборатории взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Заместитель главного редактора

Богомолов Леонид Михайлович, д-р физ.-мат. наук, директор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

Ответственный секретарь

Прытков Александр Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

- **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 автоматизации 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
- **Закупин Александр Сергеевич**, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск – *зам. главного редактора*
- **Ковалев Дмитрий Петрович**, д-р физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск
- **Кочарян Геворг Грантович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт динамики геосфер РАН, Москва
- **Куркин Андрей Александрович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород
- **Лабай Вячеслав Степанович**, д-р биол. наук, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск
- **Левин Владимир Алексеевич**, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт автоматизации 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
- **Марапупец Юрий Валентинович**, д-р физ.-мат. наук, доцент, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка
- **Огородов Станислав Анатольевич**, профессор РАН, д-р геогр. наук, чл.-корр. РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- **Плехов Олег Анатольевич**, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
- **Разжигаяева Надежда Глебовна**, д-р геогр. наук, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток
- **Ребetsкий 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, Киргизия
- **Сасорова Елена Васильевна**, д-р физ.-мат. наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Editorial Board*Editor-in-Chief*

Peter O. Zav'yalov, Corr. Member of the RAS, Dr. Sci. (Geography), Deputy Director, Head of the Laboratory of land-ocean interactions and the anthropogenic impact, P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia

Deputy Editor-in-Chief

Leonid M. Bogomolov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Director, Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Executive Secretary

Alexander S. Prytkov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

- **Vitaly V. Adushkin**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Geosphere Dynamics of RAS; Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow
- **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
- **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 RAS, Moscow
- **Andrei A. Kurkin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod
- **Vyacheslav S. Labay**, Dr. Sci. (Biology), Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk
- **Vladimir A. Levin**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, 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
- **Stanislav A. Ogorodov**, Professor of RAS, Dr. Sci. (Geogr.), Corr. Member of RAES, Lomonosov Moscow State University, Moscow
- **Oleg A. Plekhov**, Corr. Member of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of RAS, Perm'
- **Nadezhda G. Razjigaeva**, Dr. Sci. (Geogr.), Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok
- **Yuri L. Rebetskiy**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow
- **Mikhail V. Rodkin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of RAS, Moscow
- **Anatoly K. Rybin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Research Station of RAS in Bishkek City, Bishkek, Kyrgyzstan
- **Elena V. Sadorova**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow

Редакционная коллегия

- **Сергеева Ирина Вячеславовна**, д-р биол. наук, профессор, Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, Саратов
- **Такахаши Хироаки**, профессор, Институт сейсмологии и вулканологии Университета Хоккайдо, Саппоро, Япония
- **Троицкая Юлия Игоревна**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород; Нижегородский гос. университет им Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
- **Христофорова Надежда Константиновна**, д-р биол. наук, профессор, чл.-корр. РАЕН, Заслуженный деятель науки РФ, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток
- **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
- **Шеменда Александр Ильич**, профессор исключительного класса, Университет Ниццы София-Антиполис, Ницца, Франция
- **Ярмолюк Владимир Викторович**, академик РАН, д-р геол.-минер. наук, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Editorial Board

- **Irina V. Sergeeva**, Dr. Sci. (Biology), Professor, Saratov State Vavilov Agrarian University, Saratov
- **Hiroaki Takahashi**, Professor, Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, Sapporo, Japan
- **Yuliya I. Troitskaya**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod; Lobachevsky University, Nizhny Novgorod
- **Nadezhda K. Khristoforova**, Dr. Sci. (Biology), Professor, Corr. Member of RAES, Far Eastern Federal University, Vladivostok
- **Renat B. Shakirov**, Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Associate Professor, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- **Georgiy V. Shevchenko**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk
- **Alexandre I. Chemenda (Shemenda)**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professeur des Universités de Classe Exceptionnelle, Université de Nice Sophia Antipolis, Nice, France
- **Vladimir V. Yarmolyuk**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of RAS, Moscow

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. (Регистрационный номер ПИ № ФС 77-73243 от 13.07.2018 г.). Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Переводчики **Качесова Галина Сергеевна**
Новикова Татьяна Юрьевна

Редактор к.ф.н. **Низяева Галина Филипповна**
Компьютерная верстка **Филимонкина Анна Александровна**
Дизайн **Леоненкова Александра Викторовна**

Адрес редакции журнала и типографии:
693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.
gtrz-journal@mail.ru

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 14.8.
Тираж 150 экз. Заказ 8028. Свободная цена.
Дата выхода в свет 21.12.2023.

Подписной индекс в Объединенном интернет-каталоге «Пресса России» (www.pressa-rr.ru) – 80882.
По вопросам распространения обращаться также в редакцию.

Translators **Galina S. Kachesova**
Tatiana Yu. Novikova

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

Postal address of the Editorial Office and printing house:
1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022.
gtrz-journal@mail.ru

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 14.8.
Number of copies 150. Order no. 8028. Free price.
Date of publishing 21.12.2023.

Subscription index in the United web-catalogue "Press of Russia" (www.pressa-rr.ru) – 80882.
Please also contact the Editorial Office for distribution.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Геофизика. Сейсмология

Н.А. Сычева. Исследование сеймотектонических деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть II . . . 335

Океанология. Геоморфология и палеогеография

Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, Т.А. Гребенникова, А.А. Харламов, А.В. Лоскутов, Р.Ф. Булгаков. Геологические свидетельства проявлений сильных цунами на побережье острова Итуруп (Курильские острова) за последние 3500 лет 357

Геоморфология и палеогеография

Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, Т.А. Гребенникова, Л.М. Мохова, Х.А. Арсланов. Озерные палеоархивы изменений природной среды полуострова Песчаный, Японское море (южное Приморье) 375

Механика деформируемого твердого тела.

Геомеханика

И.А. Пантелеев, В.И. Окунев, В.А. Новиков. Синхронизация мультифрактальных свойств непрерывной акустической эмиссии при подготовке и реализации подвижки по модельному разлому 405

Региональная геология. Геомеханика

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

П.А. Каменев, А.Р. Лукманов. О некоторых закономерностях развития трещиноватости в терригенных породах острова Сахалин 419

Вулканология, петрология

МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.В. Дегтерев, М.В. Чибисова. Вулканическая активность на Курильских островах в 2022 г. 427

Хроника научной жизни

Научное сотрудничество Вьетнамской академии наук и технологий (ВАНТ) и ТОИ ДВО РАН. *Р.Б. Шакиров, Н.С. Сырбу, М.Г. Валитов, Г.Н. Шкабарня, А.Л. Веникова, Н.Л. Соколова, Е.В. Мальцева.* 439

Сахалинская группа реагирования на вулканические извержения (SVERT): 20 лет мониторинга вулканической активности на Курильских островах. *М.В. Чибисова, А.В. Дегтерев, А.В. Рыбин, Ф.А. Романюк.* 448

Тематический и авторский указатели статей, опубликованных в журнале «Геосистемы переходных зон» в 2023 г. (том 7) 454

Geophysics. Seismology

N.A. Sycheva. Study of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan Mountain region. Part II 335

Oceanology. Geomorphology and Paleogeography

N.G. Razjigaeva, L.A. Ganzey, T.A. Grebennikova, A.A. Kharlamov, A.V. Loskutov, R.F. Bulgakov. Geological evidence of strong tsunami manifestations on the Iturup Island (Kuril Islands) at last 3500 years. 357

Geomorphology and Paleogeography

N.G. Razjigaeva, L.A. Ganzey, T.A. Grebennikova, L.M. Mokhova, Kh.A. Arslanov. Lacustrine paleoarchives of environmental changes of Peschany Peninsula, Sea of Japan (South Primorye) 375

Mechanics of deformable solids.

Geomechanics

I.A. Panteleev, V.I. Okunev, V.A. Novikov. Synchronization of multifractal properties of continuous acoustic emission during the preparation and implementation of dynamic slip in model fault 405

Regional geology. Geomechanics

SHORT REPORT

P.A. Kamenev, A.R. Lukmanov. Patterns of fracturing placement in terrigenous rocks of Sakhalin Island 419

Volcanology, petrology

MONITORING OF GEOLOGICAL HAZARDS

A.V. Degterev, M.V. Chibisova. Volcanic activity on the Kuril Islands in 2022 427

Current scientific events

Scientific cooperation between the Vietnam Academy of Science and Technology (VAST) and POI FEB RAS. *R.B. Shakirov, N.S. Syrbu, M.G. Valitov, G.N. Shkabarnya, A.L. Venikova, N.L. Sokolova, E.V. Malteva.* 439

Sakhalin Volcanic Eruption Response Team (SVERT): 20 years of monitoring of volcanic activity on the Kuril Islands. *M.V. Chibisova, A.V. Degterev, A.V. Rybin, F.A. Romanyuk.* 448

Topical index of articles published in the journal “Geosystems of Transition Zones” in 2023 (volume 7) 455

© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.34+539.42

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.405-418>
<https://www.elibrary.ru/bpomeb>

Синхронизация мультифрактальных свойств непрерывной акустической эмиссии при подготовке и реализации подвижки по модельному разлому

И. А. Пантелеев¹, В. И. Окунев², В. А. Новиков²

@E-mail: pia@icmm.ru

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Резюме. Согласно модели прерывистого скольжения, относительное движение берегов разлома представляет собой акт неустойчивого проскальзывания, при котором движение начинается после достижения напряжениями, касательными к плоскости разлома, определенного предела. Физический механизм динамического проскальзывания по разлому заключается в последовательном формировании в зоне контакта конгломератов нагруженных частиц (силовых цепочек) и последующем их разрушении. Данные цепочки в совокупности формируют силовой скелет, характеризующийся определенной пространственной структурой и прочностными характеристиками. Повышение сдвигового напряжения на берегах разлома приводит к локальным разрушениям силового скелета, дальнейшая эволюция системы выводит процессы деструкции на более высокие пространственные уровни, что в результате приводит к сдвигу берегов разлома. Так как развитие процесса деструкции силовых цепочек в контактной зоне разлома по иерархии масштабов снизу-вверх подобно развитию трещинообразования в нагруженной среде от микромасштаба до макромасштаба (масштаба образца), авторами была высказана гипотеза о когерентном поведении акустических шумов, сопровождающих подготовку динамического проскальзывания и регистрируемых в различных областях зоны разлома. Настоящая работа посвящена проверке данной гипотезы в лабораторном масштабе на установке, имитирующей подвижку по разлому. В результате проведенного анализа подтверждена гипотеза о синхронизации статистических свойств акустической эмиссии при подготовке и реализации динамической подвижки. Показано, что наблюдение (выявление) эффекта синхронизации статистических свойств акустической эмиссии зависит как от набора параметров, для которых рассчитывается спектральная мера когерентности, так и от места регистрации исходных данных.

Ключевые слова: модельный разлом, акустическая эмиссия, синхронизация, мультифрактальные свойства

Synchronization of multifractal properties of continuous acoustic emission during the preparation and implementation of dynamic slip in model fault

Ivan A. Panteleev¹, Vladimir I. Okunev², Victor A. Novikov²

@E-mail: pia@icmm.ru

¹ Institute of Continuous Media Mechanics, UB RAS, Perm, Russia

² Joint Institute of High Temperatures, RAS, Moscow, Russia

Abstract. According to the stick-slip model, the relative movement of the fault planes is an act of unstable sliding, where movement begins when the stresses tangential to the fault plane reach a certain limit. The physical mechanism of dynamic slip along a fault consists of the sequential formation of conglomerates of loaded particles (force chains) in the contact zone and their subsequent destruction. These chains together form a force skeleton characterized by a specific spatial

structure and strength properties. An increase in shear stress on the fault banks leads to local destruction of the strength skeleton; further evolution of the system brings destruction processes to higher spatial levels, ultimately leading to a shift in the fault banks. Since the evolution of the process of destruction of force chains in the contact zone of a fault along the hierarchy of scales from bottom to top is similar to the evolution of crack formation in a loaded medium from microscale to macroscale (specimen scale), the authors hypothesized the coherent behavior of acoustic noise accompanying the preparation of dynamic slip and recorded in different areas of fault zones. This work is devoted to testing this hypothesis on a laboratory scale, using an installation that simulates movement along a fault. As a result of the analysis, the hypothesis about the synchronization of the statistical properties of the acoustic emission during the preparation and implementation of the dynamic movement was confirmed. It is shown that the observation (detection) of the effect of the synchronization of the statistical properties of acoustic emission depends both on the set of parameters for which the spectral coherence measure is calculated and on the location of the recording of the initial data.

Keywords: model fault, acoustic emission, synchronization, multifractal properties

Для цитирования: Пантелеев И.А., Окунев В.И., Новиков В.А. Синхронизация мультифрактальных свойств непрерывной акустической эмиссии при подготовке и реализации подвижки по модельному разлому. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 4, с. 405–418. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.405-418>; <https://www.elibrary.ru/bpomeb>

For citation: Panteleev I.A., Okunev V.I., Novikov V.A. Synchronization of multifractal properties of continuous acoustic emission during the preparation and implementation of dynamic slip in model fault. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 4, pp. 405–418. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.4.405-418>; <https://www.elibrary.ru/bpomeb>

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-77-30008).

Funding

The work has been made with the financial support of Russian Science Foundation (Grant No. 19-77-30008).

Введение

Изучение закономерностей развития разломных зон в кристаллическом фундаменте, стадийности подготовки и реализации подвижки по магистральному сместителю как потенциальному очагу землетрясения является актуальной задачей современной тектонофизики, механики разломных зон и физики очага [1–4]. Наиболее широко распространенным подходом к решению данного класса задач является лабораторный физический эксперимент, базирующийся, в частности, на моделях прерывистого скольжения («stick-slip») [5]. Наличие локальной ослабленной зоны, содержащей контактную поверхность, определяет единственно возможный механизм деформирования такой системы – смещение по контакту. Согласно модели прерывистого скольжения, движение в очаге представляет собой акт неустойчивого проскальзывания, при котором движение начинается после достижения напряжениями, касательными к плоскости разлома, определенного предела. Жесткость ослабленной зоны и свойства заполнителя контакта определяют возможные режимы скольжения по контакту [3, 6–8].

Ранее в работах [9–12] на основе анализа статистических свойств низкочастотного

микросейсмического шума в различных сейсмоактивных районах было показано, что подготовка крупных сейсмических событий сопровождается синхронизацией параметров такого шума на огромных пространственных областях. При этом физической причиной наблюдаемого когерентного поведения низкочастотных шумов является вовлечение в процесс подготовки (аккумуляции энергии) все большего количества разноранговых блоков земной коры [13, 14]. Аналогичные закономерности были обнаружены ранее в лабораторном масштабе при подготовке разрушения образцов различных структурно-неоднородных материалов [15–17], они легли в основу модели лавинно-неустойчивого трещинообразования [17–18]. Формирование очага будущего макроразрушения происходит ввиду роста плотности дефектов, их взаимодействия и последовательного укрупнения. Взаимодействие дефектов различных рангов в нагруженной среде является, по-видимому, возможной причиной синхронизации статистических свойств непрерывной акустической эмиссии (АЭ), обнаруженной при разрушении структурно-неоднородных материалов [19].

Согласно [20–21], физический механизм динамического проскальзывания по разлому

заключается в последовательном формировании в зоне контакта конгломератов нагруженных частиц (силовых цепочек) и последующем их разрушении. Данные цепочки в совокупности формируют силовой скелет, характеризующийся определенной пространственной структурой и прочностными характеристиками. Повышение сдвигового напряжения на берегах разлома приводит к локальным разрушениям силового скелета, дальнейшая эволюция системы выводит процессы деструкции на более высокие пространственные уровни, что в результате приводит к сдвигу берегов разлома.

Так как развитие процесса деструкции силовых цепочек в контактной зоне разлома по иерархии масштабов снизу-вверх подобно развитию трещинообразования в нагруженной среде от микро- до макромасштаба (масштаба образца), авторами была высказана гипотеза о когерентном поведении акустических шумов, сопровождающих подготовку динамического проскальзывания берегов модельного разлома (в модели «stick-slip») и регистрируемых в его различных областях. Настоящая работа посвящена проверке данной гипотезы в лабораторном масштабе на установке, имитирующей подвижку по разлому, с *in situ* регистрацией акустической эмиссии на подвижном блоке и неподвижном основании.

1. Методика проведения эксперимента

Установка, на которой проводились эксперименты по моделированию прерывистого скольжения, является модификацией слайд-модели [5, 22]. Модель представляет собой систему из бетонного блока, нагруженного постоянным нормальным усилием и движущегося по горизонтальному стеклянному основанию под действием сдвигового усилия, приложенного через пружину жесткостью $K = 16.57$ Н/мм. В начале опыта система находилась в покое, далее конец пружины двигался при помощи электропривода с постоянной скоростью 10 мкм/с в течение всего эксперимента. Между блоком и подложкой располагался слой заполнителя (просеянного высушенного речного песка) толщиной около 3 мм. Масса блока состав-

ляла 200 кг, а площадь контакта $S = 0.0256$ м². В ходе проведения опыта контролировались зависимости сдвигового усилия (датчик усилия УММА-К200, точность измерения 0.01 кгс) и перемещения блока (датчик СТЕ-3000, точность измерения 0.1 мм) от времени.

Для регистрации акустической эмиссии при проскальзывании бетонного блока была использована восьмиканальная система Amsy-6 Vallen (Германия) с предусилителями АЕР4 (коэффициент усиления 34дБ) и преобразователями акустической эмиссии двух типов. Для регистрации сигналов акустической эмиссии на подвижном блоке (на боковой поверхности) использовались три широкополосных преобразователя 2SMEG-P (Deci, США), работающих в диапазоне 200–2000 кГц (каналы № 1, 2, 6). Для регистрации акустической эмиссии на неподвижном основании были использованы миниатюрные преобразователи М-31 (Fujisera, Япония) с плоской амплитудно-частотной характеристикой в интервале 300–800 кГц (каналы № 3, 4, 8). Датчики размещались под слоем песка, чтобы вся область возможного расположения источников акустической эмиссии имела одинаковые условия для распространения упругих волн. Преобразователи акустической эмиссии крепились и на блоке, и на основании при помощи цианакрилатного клея. Схема расположения датчиков АЭ представлена на рис. 1.

Запись волновых форм акустической эмиссии по всем шести каналам в течение эксперимента осуществлялась в непрерывном беспороговом режиме с частотой дискретизации 2.5 МГц. До начала эксперимента система была проверена на отсутствие электромагнитных наводок при включенном приводе и системе измерения усилия и перемещения.

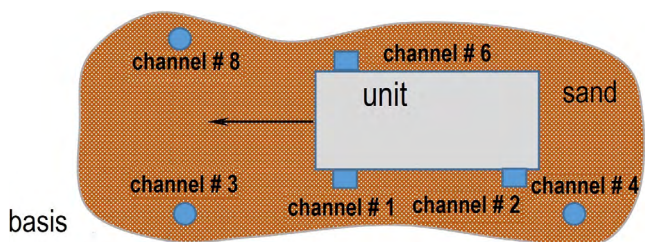


Рис. 1. Схема расположения датчиков акустической эмиссии.
Fig. 1. Layout of acoustic emission sensors.

2. Статистические свойства и методы анализа данных акустической эмиссии

Основываясь на результатах анализа геофизических полей различной природы при мониторинге подготовки крупных сейсмических событий [12], авторами была принята гипотеза о том, что коррелированное поведение сигналов акустической эмиссии должно проявляться не в целом для всего регистрируемого волнового поля, а на определенных частотах, связанных с характерными масштабами исследуемого процесса. При этом для избавления от отрицательного влияния размерного (масштабного) эффекта, характеристик используемой аппаратуры и измерительного тракта, необходимо перейти от поиска корреляций в исходных данных к поиску синхронного, коррелированного поведения параметров, описывающих статистические свойства исходных сигналов. В качестве статистических свойств сигналов акустической эмиссии были выбраны параметры их мультифрактальных спектров: ширина спектра ΔH и величина носителя спектра сингулярности H_{max} , реализующего его максимум.

Мультифрактальный анализ в настоящее время является широко используемым инструментом для исследований временной и пространственной динамики систем различной сложности [23–30]. Во многих отраслях знаний показано, что деградация динамики сложной эволюционирующей системы в поле внешних воздействий от мультифрактальной к монофрактальной отражает потерю этой системой инструментов адаптации и сокращение количества каналов диссипации «закачиваемой» в нее энергии. Для построения мультифрактального спектра временных сигналов акустической эмиссии был использован алгоритм MF-DFA (мультифрактальный метод на основе анализа флуктуаций анализируемых данных с исключенным наклоном), который, в отличие от методов, использующих быстрое преобразование Фурье и вейвлет-преобразование, является прямым методом построения частичных функций. Подробный алгоритм расчета мультифрактального спектра сигнала можно найти, например, в [19].

Для исследования степени коррелированности временных рядов параметров мультифрактального спектра сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных на подвижном блоке и неподвижном основании, использовалась частотно-зависимая мера когерентного поведения компонент многомерных временных рядов, введенная в работах А.А. Любушина [31–32]. Спектральная мера когерентности $k(t, \nu)$ строится как произведение модулей покомпонентных канонических когерентностей

$$k(t, \nu) = \prod_{j=1}^m |\mu_j(t, \nu)|, \quad (1)$$

где $m \geq 2$ – общее число совместно анализируемых временных рядов (размерность многомерного временного ряда), ν – частота, t – временная координата правого конца скользящего временного окна, состоящего из определенного числа смежных отсчетов, $\mu_j(t, \nu)$ – каноническая когерентность j -го скалярного временного ряда, которая описывает силу связанности этого ряда со всеми прочими рядами. Величина $|\mu_j(t, \nu)|^2$ является обобщением традиционного квадратичного спектра когерентности между двумя сигналами на случай, когда второй сигнал является не скалярным, а векторным. Выполняется неравенство $0 \leq |\mu_j(t, \nu)| \leq 1$, и чем ближе значение $|\mu_j(t, \nu)|$ к единице, тем сильнее линейно связаны вариации на частоте ν во временном окне с координатой t -го ряда с аналогичными вариациями во всех прочих рядах. Соответственно, величина $0 \leq k(t, \nu) \leq 1$, в силу своего построения, описывает эффект совокупного когерентного (синхронного, коллективного) поведения всех сигналов.

Частотно-зависимые канонические когерентности $\mu_j(\nu)$ для временного многомерного ряда заданного размера (фиксированного размера временного окна) определяются как

$$\mu_j^2(\nu) = S_j^H(\nu) \left(S^{(j)}(\nu) \right)^{-1} S_j(\nu) / P_j(\nu), \quad (2)$$

где $S^{(j)}(\nu)$ – эрмитова матрица размером $(m-1) \times (m-1)$, которая получается из полной спектральной матрицы $S(\nu)$ размером $m \times m$ многомерного временного ряда путем удаления i -го столбца и j -й строки; $S_j(\nu)$ – $(m-1)$ -мерный вектор, состоящий из кросс-спектров между j -й компонентой временного ряда и всеми

прочими компонентами. Вектор $S_j(v)$ состоит из элементов i -го столбца полной спектральной матрицы $S(v)$, за исключением элемента в j -й строке, $S_j^H(v)$ – эрмитово сопряжение вектора $S_j(v)$. Наконец, $P_j(v)$ является спектром мощности j -й компоненты многомерного временного ряда, т.е. j -м элементом на главной диагонали полной спектральной матрицы $S(v)$. Поскольку матрица $S_j(v)$ является эрмитовой и положительно-определенной, то квадратичная форма $S_j^H(v) \left(S^{(j)}(v) \right)^{-1} S_j(v)$ вещественна и неотрицательна. Несомненным преимуществом этого подхода является отсутствие ограничений на количество анализируемых одновременно рядов и их размер.

3. Результаты эксперимента

На рис. 2 представлено изменение с течением времени усилия, прикладываемого к бетонному блоку. Видно, что динамическая подвижка блока сопровождается падением усилия на 2.3 кг. Характерные сигналы акустической эмиссии, зарегистрированные на неподвижном основании и подвижном блоке, приведены на рис. 3. Для вычисления статистических свойств каждый из записанных сиг-

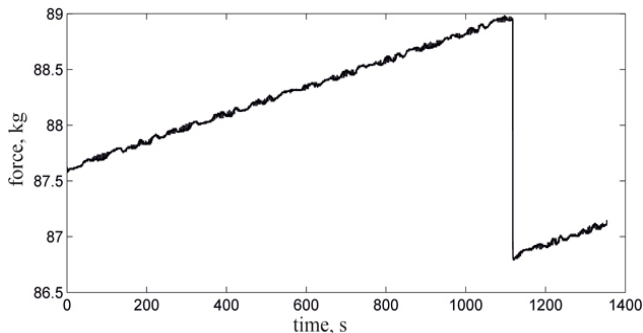
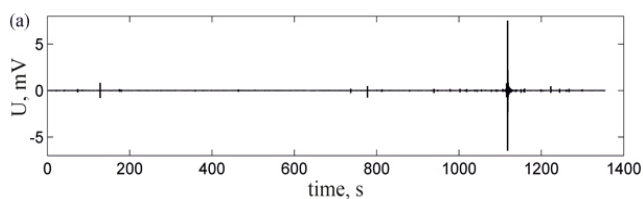


Рис. 2. Изменение усилия во временной окрестности динамической подвижки бетонного блока.

Fig. 2. Change in force in the temporary vicinity of the dynamic slip of a concrete block.



налов прореживался так, что итоговая частота дискретизации сократилась в 16 раз (с 2.5 МГц до 156.25 кГц). Необходимость уменьшения объема обрабатываемых данных, с одной стороны, определяется целесообразностью поиска корреляций на временах на порядки выше, чем время между двумя соседними отсчетами, а с другой стороны – необходимостью оптимизации затрат машинного времени.

Мультифрактальный спектр каждого из сигналов АЭ вычислялся в скользящем временном окне размером 104.85 мс, с шагом 52.425 мс. Эволюция параметров мультифрактального спектра по каждому из каналов с течением времени представлена на рисунках 4 и 5. Из анализа построенных зависимостей следует, что тенденции изменения ширины спектра подобны как для датчиков, установленных на блоке, так и для датчиков, установленных на основании. Во временной окрестности наблюдается увеличение ширины мультифрактального спектра для сигналов АЭ, зарегистрированных каждым из каналов. Иная ситуация наблюдается для носителя спектра, реализующего его максимум. Для данных АЭ с основания данный параметр резко возрастает при сбросе усилия, тогда как для данных АЭ с блока он уменьшается.

Величина спектральной меры когерентного поведения оценивалась в соответствии с соотношением (1) в скользящем временном окне трех различных размеров 13.4, 53 и 429.5 секунд с шагом в каждом случае 0.21 с. Различные размеры временного окна были взяты для поиска корреляций на больших (429.5 с), средних (53 с) и малых (13.4 с) временах.

Для оценки вариаций спектральной меры когерентного поведения временных рядов с течением времени могут быть рассмотрены различные комбинации рядов статистических свойств акустической эмиссии. Так, спектраль-

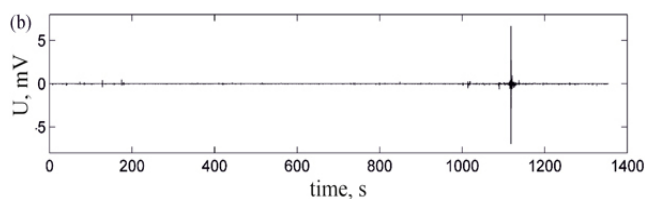


Рис. 3. Характерные сигналы акустической эмиссии, зарегистрированные на подвижном блоке (а) и неподвижном основании (б).

Fig. 3. Characteristic acoustic emission signals recorded on a moving block (a) and a fixed base (b).

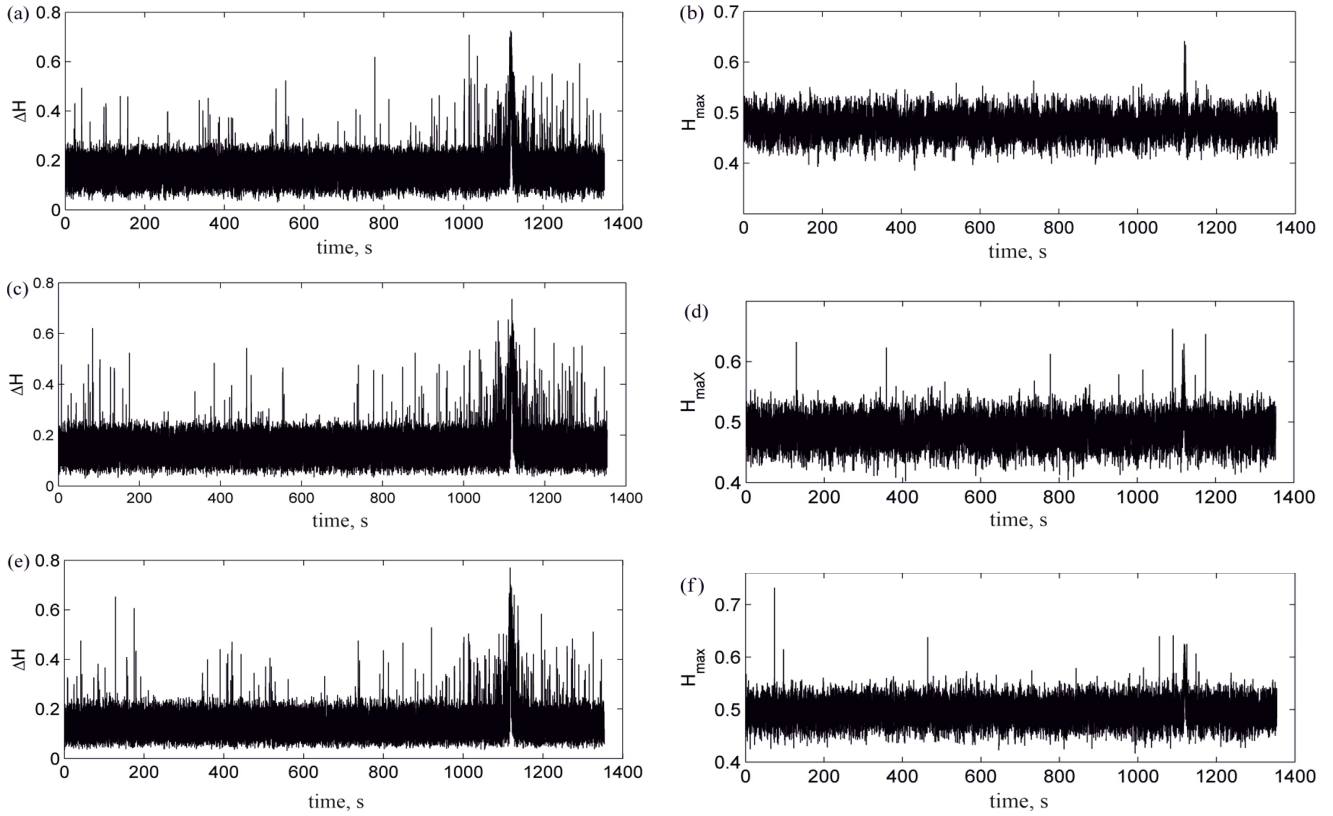


Рис. 4. Временная динамика ширины мультифрактального спектра (а, с, е) и носителя спектра, реализующая его максимум (b, d, f) для установленных на основании датчиков № 3 (а, b), № 4 (с, d) и № 8 (е, f).

Fig. 4. Time dynamics of the width of the multifractal spectrum (a, c, e) and the spectrum carrier, realizing its maximum (b, d, f) for sensors No. 3 (a, b), No. 4 (c, d) and installed on the base No. 8 (e, f).

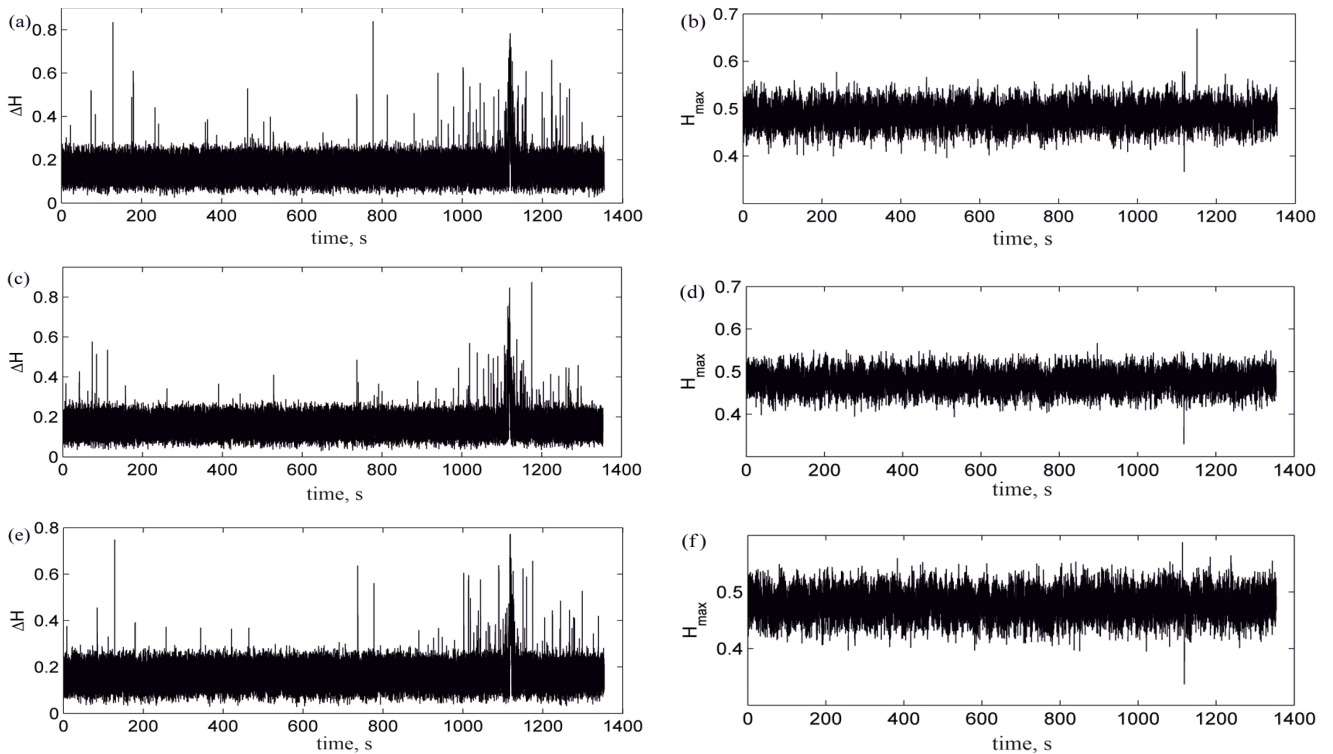


Рис. 5. Временная динамика ширины мультифрактального спектра (а, с, е) и носителя спектра, реализующая его максимум (b, d, f) для установленных на подвижном блоке датчиков № 1 (а, b), № 2 (с, d) и № 6 (е, f).

Fig. 5. Time dynamics of the width of the multifractal spectrum (a, c, e) and the spectrum carrier, realizing its maximum (b, d, f) for sensors No. 1 (a, b), No. 2 (c, d) and No. 6 (e, f) installed on the moving block.

ная мера может быть оценена отдельно для рядов каждого параметра мультифрактального спектра, для обоих параметров, для параметров сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных на основании и подвижном блоке или отдельно только на основании или только на блоке. В рамках данной работы была реализована многовариантная процедура расчета вариаций спектральной меры когерентного поведения временных рядов мультифрактальных свойств акустической эмиссии. Результаты были объединены в два блока.

3.1 Когерентное поведение параметров мультифрактального спектра после сброса усилия

В качестве первого шага в исследовании коррелированного изменения статистических свойств непрерывной акустической эмиссии при подготовке и реализации динамической подвижки были выявлены условия, при которых наблюдается коррелированное изменение статистических свойств акустической эмиссии с момента сброса усилия. Необходимо отметить, что критерием коррелированного поведения временных рядов статистических свойств акустической эмиссии являлось превышение в каком-либо интервале частот спектральной мерой когерентности $k(t, \nu)$ фоновых значений (на других частотах) более чем в 3 раза. Сводные данные представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что наиболее часто синхронизация временных рядов после сброса усилия наблюдается для ширины мультифрактального спектра сигналов акустической эмиссии независимо от места их регистрации. Только для сигналов, зарегистрированных на неподвижном основании, такая корреляция отсутствует. На рис. 6 представлена эволюция спектральной меры $k(t, \nu)$ когерентного поведения временных рядов ширины мультифрактального спектра акустической эмиссии, зарегистрированной на неподвижном основании и подвижном блоке, для среднего и большого временного окна. В обоих случаях после реализации динамической подвижки (сброса усилия) наблюдается коррелированное поведение указанных временных рядов в интервале

частот 1–2 Гц (величина спектральной меры на порядок превышает фоновый уровень). С некоторой задержкой повышенная корреляция сигналов также проявляется в интервале 3–4 Гц.

Наихудшая, с точки зрения обнаружения коррелированного поведения рядов статистических свойств непрерывной акустической эмиссии, ситуация наблюдается для данных параметра H_{max} . Когерентное поведение многомерных временных рядов этого параметра имеет место только для наибольшего временного окна (429.5 с) независимо от места регистрации сигналов акустической эмиссии (рис. 7). Необходимо отметить, что коррелированное поведение временных рядов в этом случае наблюдается также для двух интервалов частот, один из которых совпадает с обнаруженным для ширины спектра (1–2 Гц), а второй смещен в область более высоких частот (4–5 Гц).

На представленных рисунках эволюции спектральной меры когерентного поведения многомерных временных рядов параметров мультифрактального спектра акустической эмиссии видно, что частотные интервалы коррелированного поведения проявляются и до

Таблица 1. Сводные данные синхронизации временных рядов параметров мультифрактального спектра акустической эмиссии с момента сброса усилия

Table 1. Summary data for synchronization of time series of parameters of the acoustic emission multifractal spectrum from the moment of force release

Параметр спектра	Окно, секунды	Основание + блок	Основание	Блок
$\Delta H + H_{max}$	13.4	+	–	–
	53	+	+	+
	429.5	+	+	+
ΔH	13.4	+	–	+
	53	+	+	+
	429.5	+	+	+
H_{max}	13.4	–	–	–
	53	–	–	–
	429.5	+	+	+

Примечание. «+» – синхронное изменение выбранных временных рядов, «–» – отсутствие корреляции рядов на каких-либо частотах.

Note. “+” – synchronous change of selected time series, “–” – absence of correlation of series at any frequencies.

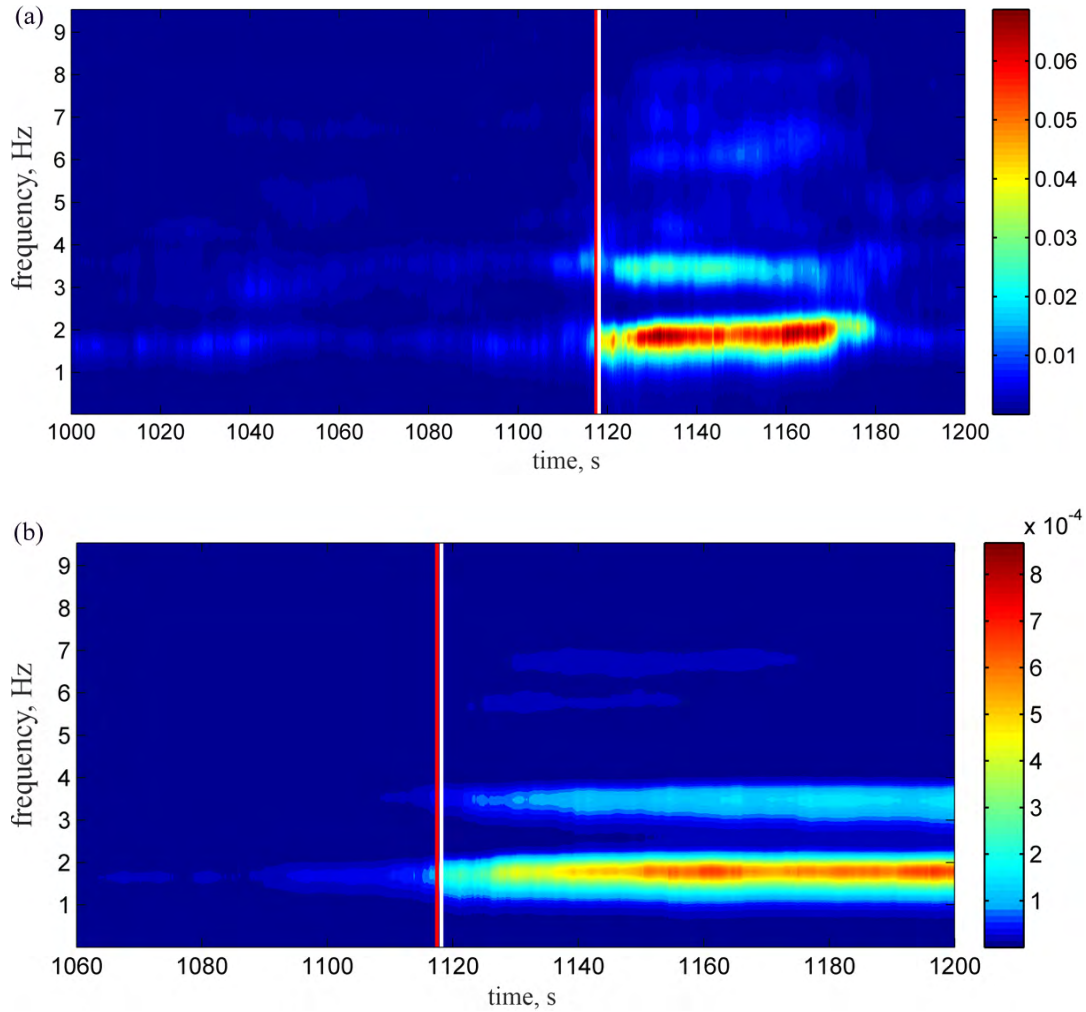


Рис. 6. Эволюция спектральной меры когерентного поведения многомерного временного ряда ширины мультифрактального спектра акустической эмиссии, зарегистрированной на основании и подвижном блоке для временного окна 53 (а) и 429.5 с (b)
Fig. 6. Evolution of the spectral measure of the coherent behavior of the multidimensional time series of the width of the acoustic emission multifractal spectrum recorded on the base and moving block for a time window of 53 (a) and 429.5 s (b).

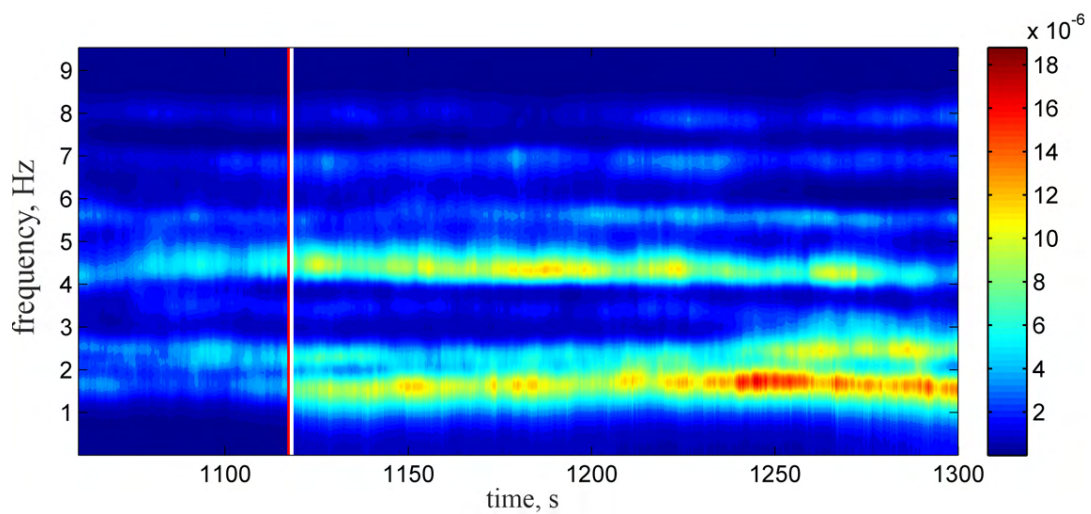


Рис. 7. Эволюция спектральной меры когерентного поведения многомерного временного ряда параметра H_{max} мультифрактального спектра акустической эмиссии, зарегистрированной на неподвижном основании и подвижном блоке, для временного окна 429.5 с.
Fig. 7. Evolution of the spectral measure of the coherent behavior of the multidimensional time series of the parameter of the acoustic emission multifractal spectrum recorded on a fixed base and a moving block, for a time window of 429.5 s.

реализации динамической подвижки. Однако превышение фоновой величины спектральной меры когерентного поведения незначительно и не может быть охарактеризовано как прогностический признак приближающегося динамического события.

3.2 Когерентное поведение параметров мультифрактального спектра до сброса усилия

Проведенный многовариантный расчет вариаций спектральной меры когерентного поведения временных рядов мультифрактальных свойств акустической эмиссии позволил выявить условия, при которых обнаруживается коррелированное поведение временных рядов перед наступлением динамической подвижки. Сводные результаты приведены в табл. 2.

В отличие от предыдущего случая, когерентное изменение временных рядов мульти-

Таблица 2. Сводные данные синхронизации временных рядов параметров мультифрактального спектра акустической эмиссии до динамической подвижки

Table 2. Summary data of synchronization of time series of parameters of the multifractal spectrum of acoustic emission before dynamic movement

Параметр спектра	Окно, секунды	Основание + блок	Основание	Блок
$\Delta H + H_{max}$	13.4	–	–	–
	53	–	–	–
	429.5	–	–	–
ΔH	13.4	–	+	–
	53	–	+	–
	429.5	–	–	–
H_{max}	13.4	–	–	–
	53	–	–	–
	429.5	–	+	+

Примечание. «+» – синхронное изменение выбранных временных рядов, «–» – отсутствие корреляции рядов на каких-либо частотах.

Note. “+” – synchronous change of selected time series, “–” – absence of correlation of series at any frequencies.

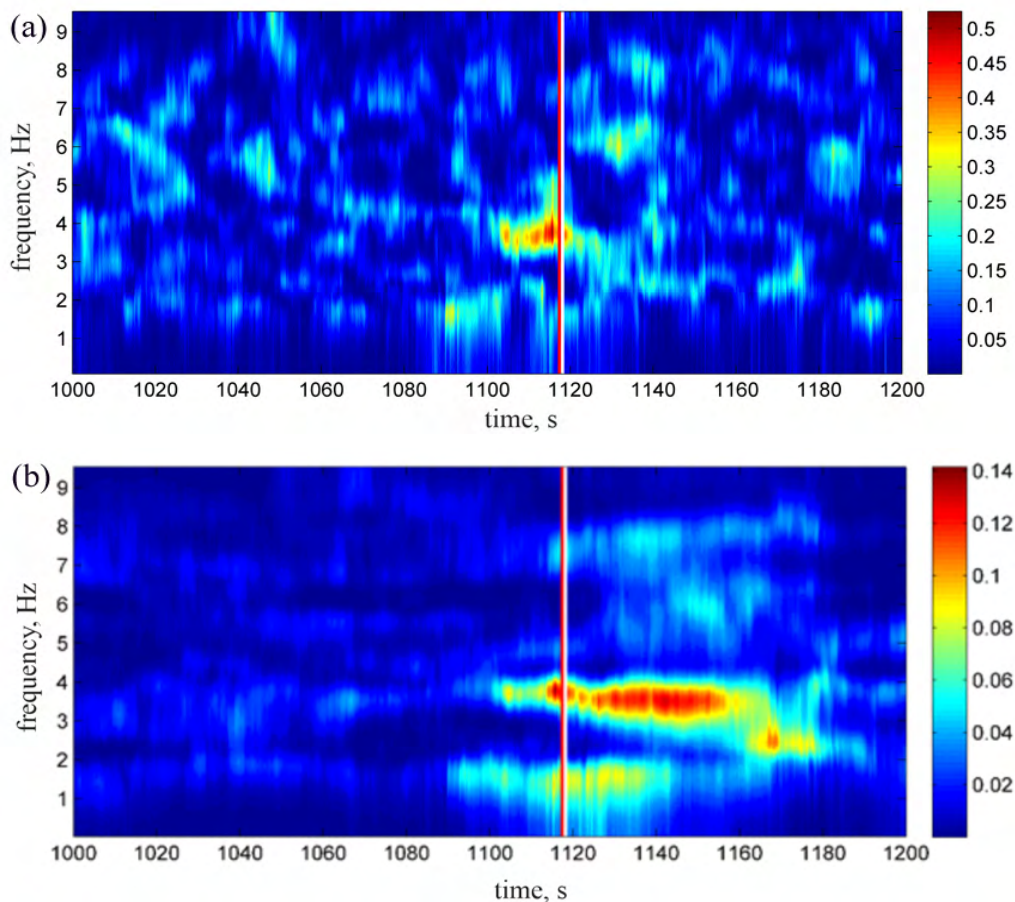


Рис. 8. Эволюция спектральной меры когерентного поведения многомерного временного ряда ширины мультифрактального спектра акустической эмиссии, зарегистрированной на основании, для временного окна 13.4 (а) и 53 с (б).

Fig. 8. Evolution of the spectral measure of the coherent behavior of the multidimensional time series of the width of the acoustic emission multifractal spectrum recorded on the base, for a time window of 13.4 (a) and 53 s (b).

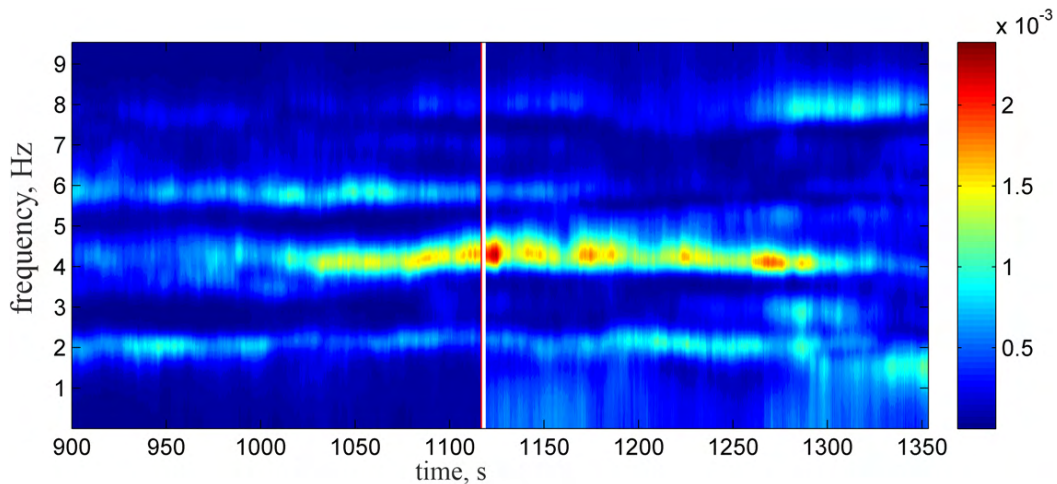


Рис. 9. Эволюция спектральной меры когерентного поведения многомерного временного ряда параметра H_{max} мультифрактального спектра акустической эмиссии, зарегистрированной на подвижном блоке, для временного окна 429.5 с.

Fig. 9. Evolution of the spectral measure of the coherent behavior of the multidimensional time series of the parameter H_{max} of the acoustic emission multifractal spectrum recorded on the moving unit for a time window of 429.5 s.

фрактальных свойств акустической эмиссии до динамической подвижки имеет место только

- для рядов ширины мультифрактального спектра акустической эмиссии, зарегистрированной на неподвижном основании, в случае оценки спектральной меры во временном окне 13.4 и 53 с (рис. 8);
- для рядов носителя спектра H_{max} , реализующего его максимум, оцененного для сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных отдельно на подвижном блоке и основании, в случае оценки спектральной меры во временном окне 429.5 с (рис. 9).

В отношении рядов ширины мультифрактального спектра видно, что их коррелированное поведение наблюдается в интервале частот 3.5–4.5 Гц. При этом при оценке спектральной меры $k(t, \nu)$ в окне размером 13.4 с коррелированное поведение фактически пропадает после динамической подвижки, тогда как для временного окна 53 с оно имеет место и после подвижки с расширением ширины частотного интервала синхронизации. Еще одно отличие построенных зависимостей заключается в длительности когерентного поведения, которое больше в случае оценки спектральной меры в окне среднего размера.

Для параметра H_{max} и оценки спектральной меры $k(t, \nu)$ во временном окне размером 429.5 с синхронизация временных рядов имеет место в интервале 4–5 Гц и начинается существенно раньше, чем в случае параметра

ΔH , что связано с размером выбранного временного окна. После динамической подвижки повышенные значения меры в этом интервале сохраняются.

4. Обсуждение результатов

Проведенная работа по анализу непрерывной акустической эмиссии, регистрируемой на подвижном блоке и неподвижном основании, позволила проверить выдвинутую авторами гипотезу о синхронизации статистических свойств акустической эмиссии при подготовке и реализации динамической подвижки. Показано, что наблюдение (выявление) эффекта синхронизации статистических свойств АЭ зависит как от набора параметров, для которых рассчитывается спектральная мера когерентности, так и от места регистрации исходных данных.

При использовании носителя мультифрактального спектра, реализующего его максимум, в качестве основного параметра, для которого ищется корреляции во временных рядах АЭ, эффекты синхронизации обнаруживаются только на больших временах (при использовании в вычислениях меры когерентности временного окна большого размера). Размер наибольшего использованного в работе окна составил 33 % от всей продолжительности эксперимента. При этом предвестниковые изменения, заключающиеся в когерентном изменении временных рядов параметра H_{max}

на определенной частоте, наблюдаются для данных, зарегистрированных либо только на основании, либо только на подвижном блоке. Комплексование данных АЭ с блока и основания приводит к потере возможности выявления предвестниковых изменений. Еще одна обнаруженная особенность состоит в том, что именно для параметра H_{max} и временного окна 429.5 с наблюдаются наиболее заблаговременные предвестниковые изменения в эволюции спектральной меры когерентности. Для данных, зарегистрированных на основании, эти изменения начинаются за 42, а для блока – за 97 с до сброса усилия (динамической подвижки).

Использование для поисков эффекта синхронизации параметра ширины мультифрактального спектра акустической эмиссии приводит к качественно иному результату. Интервалы синхронизации временных рядов этого параметра сразу после сброса усилия не обнаруживаются только в случае использования минимального временного окна и данных, полученных с основания. В остальных случаях варьируют как количество интервалов синхронизации, так и несущие частоты, на которых они расположены.

С точки зрения поиска предвестниковых изменений меры когерентности рядов ширины мультифрактального спектра АЭ, регистрация акустической эмиссии на подвижном блоке наименее предпочтительна. Независимо от размеров окна предвестниковые изменения меры когерентности в этом случае не наблюдаются. Наоборот, наиболее явно выраженные предвестники приближения динамической подвижки обнаруживаются для данных акустической эмиссии, зарегистрированной на неподвижном основании. При этом на малых и средних временах предвестниковые изменения проявляются за 15 с до подвижки.

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование корреляционных свойств непрерывной акустической эмиссии, зарегистрированной при подготовке и реализации динамической подвижки в лабораторной модели разломной зоны. Лабораторная модель

разломной зоны представляет собой классическую «слайдер-модель», в которой блок под действием приложенного сдвигового усилия скользит по поверхности раздела. Регистрация акустической эмиссии осуществлялась несколькими датчиками, установленными на боковых поверхностях подвижного блока и неподвижном основании с разных сторон от блока.

Для поиска интервалов синхронизации статистических свойств АЭ при подготовке и реализации динамической подвижки проводилось вычисление параметров мультифрактального спектра сигнала акустической эмиссии с каждого из датчиков (с использованием метода MF-DFA) и последующее вычисление спектральной меры когерентности для различного набора временных рядов параметров спектра в скользящем временном окне трех различных размеров: 13.4, 53, 429.5 с.

В результате проведенного анализа была подтверждена гипотеза о синхронизации статистических свойств акустической эмиссии при подготовке и реализации динамической подвижки. Показано, что наблюдение (выявление) эффекта синхронизации статистических свойств акустической эмиссии зависит как от набора параметров, для которых рассчитывается спектральная мера когерентности, так и от места регистрации исходных данных.

Установлены оптимальные параметры и наборы исходных данных для наблюдения эффекта синхронизации мультифрактальных свойств акустической эмиссии до и после динамической подвижки. Выявлены интервалы и особенности предвестниковых изменений спектральной меры когерентного поведения многомерных временных рядов параметров акустической эмиссии.

Полученные результаты демонстрируют перспективность использования данного подхода для акустического мониторинга реальных активных разломов, а также необходимость дальнейших исследований обнаруженного эффекта синхронизации с целью определения влияния на него таких факторов, как состав, физико-механические свойства и влажность заполнителя, скорость и режимы скольжения.

Список литературы

1. Быков В.Г. **2005**. Деформационные волны земли: концепция, наблюдения и модели. *Геология и геофизика*, 46(11): 1176–1190.
2. Семинский К.Ж. **2008**. Иерархия зонно-блоковой структуры литосферы Центральной и Восточной Азии. *Геология и геофизика*, 49(10): 1018–1030.
3. Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Новиков В.А., Остапчук А.А. **2014**. Медленные перемещения по разломам: параметры, условия возникновения, перспективы исследований. *Геодинамика и тектонофизика*, 5(4): 863–891. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0160>
4. Борняков С.А., Пантелеев И.А., Черемных А.В., Каримова А.А. **2018**. Экспериментальное исследование периодической активизации разлома в сейсмической зоне. *Геодинамика и тектонофизика*, 9(3): 653–670.
5. Brace W.F., Byerlee J.D. **1966**. Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science*, 153: 990–992. <https://doi.org/10.1126/science.153.3739.990>
6. Кочарян Г.Г., Марков В.К., Остапчук А.А., Павлов Д.В. **2013**. Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем. *Физическая мезомеханика*, 16(5): 5–15.
7. Ben-David O., Rubinstein S.M., Fineberg J. **2010**. Slip-stick and the evolution of frictional strength. *Nature*, 463: 76–79. <https://doi.org/10.1038/nature08676>
8. Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Гридин Г.А., Морозова К.Г., Hongwen J., Пантелеев И.А. **2022**. Лабораторные исследования закономерностей фрикционного взаимодействия блоков скальной породы метрового масштаба. Методика и первые результаты. *Физика Земли*, 6: 162–174.
9. Любушин А.А., Соболев Г.А. **2006**. Мультифрактальные меры синхронизации микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов. *Физика Земли*, 9: 18–28.
10. Любушин А.А. **2008**. Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки. *Физика Земли*, 4: 17–34.
11. Любушин А.А. **2009**. Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм. *Физика Земли*, 5: 15–28.
12. Любушин А.А. **2010**. Статистики временных фрагментов низкочастотных микросейсм: их тренды и синхронизация. *Физика Земли*, 6: 86–96.
13. Любушин А.А. **2011**. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсам. *Геофизические процессы и биосфера*, 10(1): 9–35.
14. Любушин А.А. **2012**. Прогноз Великого Японского землетрясения. *Природа*, 8: 23–33.
15. Мячкин В.И., Костров Б.В., Шамина О.Г., Соболев Г.А. **1975**. Основы физики очага и предвестники землетрясений. В кн.: *Физика очага землетрясения*. М.: Наука, 9–41.
16. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V.S., et al. **1992**. Observations of quasistatic fault growth from acoustic emissions. In: Evans B., Wong T.-F., et al. (Eds.). *Fault mechanics and transport properties of rocks*. London: Acad. Press, p. 3–31.
17. Соболев Г.А., Пономарев А.В. **2003**. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука, 270 с.
18. Соболев Г.А. **1993**. *Основы прогноза землетрясений*. М.: Наука, 310 с.
19. Пантелеев И.А., Баяндин Ю.В., Плехов О.А. **2022**. Эффект синхронизации статистических свойств непрерывной акустической эмиссии при деформировании структурно-неоднородных материалов. *Вестник ПНИПУ. Механика*, 3: 5–13. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2022.3.01>
20. Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Markov V.K., Krashe-ninnikov A.V. **2016**. Study of acoustic emission signals during fracture shear deformation. *Acoustical Physics*, 62(4): 505–513. <https://doi.org/10.1134/s1063771016040138>
21. Кочарян Г.Г. **2016**. *Геомеханика разломов*. М.: ГЕОС, 424 с.
22. Кочарян Г.Г., Новиков В.А. **2015**. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Ч. 1. Лабораторные эксперименты. *Физическая мезомеханика*, 18(4): 94–104.
23. Gerasimova E., Audit B., Roux S.-G., Khalil A., Gileva O., Argoul F., Naimark O., Arneodo A. **2014**. Wavelet-based multifractal analysis of dynamic infrared thermograms to assist in early breast cancer diagnosis. *Frontiers in Physiology*, 5: 176. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00176>
24. Ghost D., Dutta S., Samanta S. **2012**. Fluctuation of gold price: a multifractal approach. *Acta Physica Polonica B*, 43(6): 1261–1274.
25. Absil P., Sepulchre R., Bilge A., Gerard P. **1999**. Non-linear analysis of cardiac rhythm fluctuations using DFA method. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 271: 235–244. [https://doi.org/10.1016/s0378-4371\(99\)00295-2](https://doi.org/10.1016/s0378-4371(99)00295-2)
26. Makowiec D., Gałaska R., Dudkowska A., Rynkiewicz A., Zwierz M. **2006**. Long-range dependencies in heart rate signals – revisited. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 369: 632–644. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.02.038>
27. Biswas A., Zeleke T.B., Si B.C. **2012**. Multifractal detrended fluctuation analysis in examining scaling properties of the spatial patterns of soil water storage. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 19: 227–238. <https://doi.org/10.5194/npg-19-227-2012>
28. Movahed M.S., Jafari G.R., Ghasemi F., Rahvar S., Reza Rahimi Tabar M. **2006**. Multifractal detrended fluctuation analysis of sunspot time series. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2006(02): 02003. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2011/09/e09001>
29. Pedron I.T. **2010**. Correlation and multifractality in climatological time series. *Journal of Physics: Conference*

- Series*, 246: 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/246/1/012034>
30. Пантелеев И.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. **2016**. Пространственно-временные закономерности развития поврежденности при деформировании стекловолоконного тканого ламината по данным акустической эмиссии. *Физическая мезомеханика*, 19(4): 64–73.
 31. Любушин А.А. **1998**. Анализ канонических когерентностей в задачах геофизического мониторинга. *Физика Земли*, 1: 59–66.
 32. Любушин А.А. **2007**. *Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга*. М.: Наука, 228 с.
- ### References
1. Bykov V.G. **2005**. [Strain waves in the Earth: theory, field data, and models]. *Geologiya i Geofizika*, 46(11): 1176–1190. (In Russ.).
 2. Seminsky K.Zh. **2008**. Hierarchy in the zone-block lithospheric structure of Central and Eastern Asia. *Russian Geology and Geophysics*, 49(10): 771–779. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.11.017>
 3. Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Novikov V.A., Ostapchuk A.A. **2014**. Slow slip events: parameters, conditions of occurrence, and future research prospects. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(4): 863–891. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0160>
 4. Bornyakov S.A., Panteleev I.A., Cheremnykh A.V., Karimova A.A. **2018**. Physical modeling experiments to study periodic activation of faults in seismic zones. *Geodynamics & Tectonophysics*, 9(3): 653–670. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2018-9-3-0366>
 5. Brace W.F., Byerlee J.D. **1966**. Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science*, 153: 990–992. <https://doi.org/10.1126/science.153.3739.990>
 6. Kocharyan G.G., Markov V.K., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V. **2014**. Mesomechanics of shear resistance along a filled crack. *Physical Mesomechanics*, 17(2): 123–133. doi:10.1134/S1029959914020040
 7. Ben-David O., Rubinstein S.M., Fineberg J. **2010**. Slip-stick and the evolution of frictional strength. *Nature*, 463: 76–79. <https://doi.org/10.1038/nature08676>
 8. Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Gridin G.A., Morozova K.G., Hongwen J., Panteleev I.A. **2022**. Laboratory study on frictional behavior of rock blocks of meter scale. Methods and preliminary results. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 58: 929–940. <https://doi.org/10.1134/s1069351322060064>
 9. Lyubushin A.A., Sobolev G.A. **2006**. Multifractal measures of synchronization of microseismic oscillations in a minute range of periods. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 42: 734–744. <https://doi.org/10.1134/S1069351306090035>
 10. Lyubushin A.A. **2008**. Microseismic noise in the low frequency range (periods of 1–300 min): Properties and possible prognostic features. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 44: 275–290. <https://doi.org/10.1134/s11486-008-4002-6>
 11. Lyubushin A.A. **2009**. Synchronization trends and rhythms of multifractal parameters of the field of low-frequency microseisms. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 45: 381–394. <https://doi.org/10.1134/s1069351309050024>
 12. Lyubushin A.A. **2010**. The statistics of the time segments of low-frequency microseisms: Trends and synchronization. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 46: 544–554. <https://doi.org/10.1134/s1069351310060091>
 13. Lyubushin A.A. **2011**. Seismic catastrophe in Japan on March 11, 2011: Long-term prediction on the basis of low-frequency microseisms. *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 46: 904–921. doi:10.1134/S0001433811080056
 14. Lyubushin A.A. **2012**. [Forecast of the Great Japan Earthquake]. *Priroda = Nature*, 8: 23–33. (In Russ.)
 15. Myachkin V.I., Kostrov B.V., Shamina O.G., Sobolev G.A. **1975**. [Fundamentals of focal physics and earthquake precursors]. In: *Physics of earthquake source*. Moscow: Nauka, 9–41. (In Russ.)
 16. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V.S., et al. **1992**. Observations of quasistatic fault growth from acoustic emissions. In: Evans B., Wong T.-F., et al. (Eds.). *Fault mechanics and transport properties of rocks*. London: Acad. Press, p. 3–31.
 17. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. **2003**. [Earthquake physics and precursors]. Moscow: Nauka, 270 p. (In Russ.).
 18. Sobolev G.A. **1993**. [Fundamentals of the earthquake prediction]. Moscow: Nauka, 313 p. (In Russ.). EDN: TGSIGH
 19. Panteleev I.A., Bayandin Yu.V., Plekhov O.A. **2022**. Effect of synchronization of continuous acoustic emission statistical properties during structurally heterogeneous materials deformation. *Vestnik PNIPU. Mekhanika = Bulletin of PNIPU. Mechanics*, 3: 5–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2022.3.01>
 20. Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Markov V.K., Krasheinnikov A.V. **2016**. Study of acoustic emission signals during fracture shear deformation. *Acoustical Physics*, 62(4): 505–513. <https://doi.org/10.1134/s1063771016040138>
 21. Kocharyan G.G. **2016**. *Geomechanics of faults*. Moscow: GEOS, 424 p. (In Russ.).
 22. Kocharyan G.G., Novikov V.A. **2016**. Experimental study of different modes of block sliding along interface. Pt 1. Laboratory experiments. *Physical Mesomechanics*, 19: 189–199. <https://doi.org/10.1134/s1029959916020120>
 23. Gerasimova E., Audit B., Roux S.-G., Khalil A., Gilleva O., Argoul F., Naimark O., Arneodo A. **2014**. Wavelet-based multifractal analysis of dynamic infrared thermograms to assist in early breast cancer diagnosis. *Frontiers in Physiology*, 5: 176. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00176>

24. Ghost D., Dutta S., Samanta S. **2012**. Fluctuation of gold price: a multifractal approach. *Acta Physica Polonica B*, 43(6): 1261–1274.
25. Absil P., Sepulchre R., Bilge A., Gerard P. **1999**. Non-linear analysis of cardiac rhythm fluctuations using DFA method. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 271: 235–244. [https://doi.org/10.1016/s0378-4371\(99\)00295-2](https://doi.org/10.1016/s0378-4371(99)00295-2)
26. Makowiec D., Gałaska R., Dudkowska A., Rynkiewicz A., Zwierz M. **2006**. Long-range dependencies in heart rate signals – revisited. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 369: 632–644. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.02.038>
27. Biswas A., Zeleke T.B., Si B.C. **2012**. Multifractal detrended fluctuation analysis in examining scaling properties of the spatial patterns of soil water storage. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 19: 227–238. <https://doi.org/10.5194/npg-19-227-2012>
28. Movahed M.S., Jafari G.R., Ghasemi F., Rahvar S., Reza Rahimi Tabar M. **2006**. Multifractal detrended fluctuation analysis of sunspot time series. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2006(02): 02003. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2011/09/e09001>
29. Pedron I.T. **2010**. Correlation and multifractality in climatological time series. *Journal of Physics: Conference Series*, 246: 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/246/1/012034>
30. Panteleev I.A., Bayandin Yu.V., Naimark O.B. **2016**. [Spatial and temporal patterns of damage development during deformation of a glass fiber woven laminate according to acoustic emission data]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 19(4): 64–73. (In Russ.).
31. Lyubushin A.A., Jr. **1998**. Analysis of canonical coherences in the problems of geophysical monitoring. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 34(1): 52–58.
32. Lyubushin A.A. **2007**. [Analysis of data from geophysical and environmental monitoring systems]. Moscow: Nauka, 228 p. (In Russ.)

Об авторах

Пантелеев Иван Алексеевич (<https://orcid.org/0000-0002-7430-3667>), доктор физико-математических наук, зав. лабораторией цифровизации горнотехнических процессов, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, pia@icmm.ru

Окунев Владимир Иванович (<https://orcid.org/0000-0001-6024-0848>), старший научный сотрудник лаборатории импульсной энергетики в геофизике, Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, viok56@mail.ru

Новиков Виктор Александрович (<https://orcid.org/0000-0001-9009-8862>), кандидат технических наук, заведующий лабораторией импульсной энергетики в геофизике, Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, novikov_victor_a@mail.ru

About the Authors

Panteleev, Ivan A. (<https://orcid.org/0000-0002-7430-3667>), Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory of digitalization of mining processes, Institute of Continuum Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, pia@icmm.ru

Okunev, Vladimir I. (<https://orcid.org/0000-0001-6024-0848>), Senior Researcher at the Laboratory of pulsed power systems for geophysics, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, viok56@mail.ru

Novikov, Viktor A. (<https://orcid.org/0000-0001-9009-8862>), Cand. Sci. (Engineering), Head of the laboratory of pulsed power systems for geophysics, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, novikov_victor_a@mail.ru

Поступила 25.11.2023

Принята к публикации 4.12.2023

Received 25 November 2023

Accepted 4 December 2023