

III Всероссийская научная конференция  
с международным участием

# Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений



25-26 октября 2023, ИТПЗ РАН, Москва

III All-Russian Scientific Conference  
with International Participation

# **Modern Methods of Seismic Hazard Assessment and Earthquakes Prediction**



25-26 October 2023, IEPT RAS, Moscow

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
Российской академии наук

*Памяти члена-корреспондента РАН А.А. Соловьева*

III Всероссийская научная конференция с международным участием

# **Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений**

25-26 октября 2023 г., Москва, Россия

## **МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ И ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ**

Под редакцией к.ф.-м.н. А.П. Кержаева, к.ф.-м.н. А.И. Филипповой

Москва  
2023

Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: материалы III Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Александра Анатольевича Соловьева. 25-26 октября 2023 г. Москва: ИТПЗ РАН, 2023. – 308 с.

В сборнике публикуются материалы III Всероссийской конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», которая состоялась 25-26 октября 2023 г. в Институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва. Конференция была посвящена памяти чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Александра Анатольевича Соловьева. На конференции были представлены основные достижения в области математической геофизики, сейсмологии, геодинамики. Рассматривались методы оценки сейсмической опасности, прогноза мест возможного возникновения сильнейших сейсмических событий, алгоритмы прогноза землетрясений и методы оценки надёжности и достоверности результатов прогноза, связь геодинамики с сейсмичностью и другие вопросы из смежных областей.

Ответственные редакторы:

к.ф.-м.н. А.П. Кержаев, к.ф.-м.н. А.И. Филиппова

Компьютерная верстка:

Л.А. Бутова, О.А. Мациевская, Т.В. Прохорова

Дизайн обложки:

П.Д. Щепалина

© ИТПЗ РАН, 2023

## **ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ**

Председатель: чл.-корр. РАН П.Н. Шебалин (ИТПЗ РАН).

Заместители председателя:

д.ф.-м.н. А.И. Горшков (ИТПЗ РАН), д.ф.-м.н. Г.М. Стеблов (ИТПЗ РАН).

Члены комитета:

чл.-корр. РАН Ан.Ал. Соловьев (ГЦ РАН), д.ф.-м.н. С.В. Баранов (ИТПЗ РАН),  
д.ф.-м.н. В.А. Желиговский (ИТПЗ РАН), д.ф.-м.н. В.Г. Кособоков (ИТПЗ РАН),  
д.ф.-м.н. Р.Г. Новиков (ИТПЗ РАН), д.ф.-м.н. О.М. Подвигина (ИТПЗ РАН),  
д.ф.-м.н. М.В. Родкин (ИТПЗ РАН), д.ф.-м.н. А.В. Хохлов (ИТПЗ РАН),  
к.ф.-м.н. А.П. Кержаев (ИТПЗ РАН), к.ф.-м.н. А.И. Филиппова (ИТПЗ РАН),  
к.т.н. А.С. Фомочкина (ИТПЗ РАН).

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

Председатель: А.И. Ливинский.

Заместители председателя: к.ф.-м.н. В.А. Тимофеева, П.Д. Щепалина.

Члены комитета:

А.В. Трубенков, Л.А. Бутова, К.В. Крушельницкий, О.А. Мациевская,  
Т.В. Прохорова, М.А. Семка.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Горшков А.И. Александр Анатольевич Соловьев: жизнь в науке .....	10
Panza G.F. Alexander Soloviev – a Scientist and a Man.....	13
Агаян А.С., Некрасова А.К. Анализ пространственной кластеризации сейсмических событий алгоритмом топологической фильтрации DPS: Камчатка .....	14
Аглетдинов Э.А. Особенности сигналов акустической эмиссии при деформировании микрокристаллов цинка.....	20
Баранов С.В., Моторин А.Ю., Жукова С.А., Шебалин П.Н. Воздействие обводненности среды на магнитуду сильнейшего афтершока на примере Хибинского массива.....	25
Баранов С.В., Федоров А.В., Моторин А.Ю., Асминг В.Э., Федоров И.С. Макросейсмический эффект природно-техногенного землетрясения 5 марта 2022 года с $M_L = 3.7$ в Хибинском массиве .....	30
Бержинская Л.П., Иванова Н.В., Левина Е.А. Ружич В.В. Перспективы развития Иркутской агломерации с позиций сейсмического риска .....	33
Бурлаков И.С., Фомочкина А.С., Филиппова А.И. Исследование зависимости пространственно-временной модели очага землетрясения от используемого набора записей .....	38
Владимирова И.С. Исследование сейсмических циклов сильнейших землетрясений в зонах субдукции методами спутниковой геодезии.....	41
Герман В.И. Влияние выбора метода перевода энергетических классов в магнитуды на оценки сейсмической опасности .....	45
Гоев А.Г. Новые данные о строении земной коры и верхней мантии Кольского региона методом функций приемника .....	50
Горшков Б.Г., Ильинский Д.А., Симикин Д.Е., Таранов М.А. Регистрация землетрясений распределенным акустическим датчиком (DAS), размещенным на мелководье Черного моря .....	54
Гравиров В.В. Цифровые системы сбора геофизической информации: способы проверки работоспособности в полевых условиях.....	57
Гравиров В.В., Кислов К.В. Распределенное акустическое зондирование (DAS): на пути к стандартизации.....	62
Гравиров В.В., Лиходеев Д.В., Кислов К.В. Совершенствование геофизического приборного комплекса, установленного в лаборатории геофизических исследований ИФЗ РАН в дальней штольне БНО .....	67
Греков Е.М. Анализ извержения исландского вулкана Бардарбунга 2015 года с точки зрения режима сейсмичности .....	72
Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П. Выявление особенностей влияния скоростных неоднородностей грунтовых слоев на сейсмические воздействия сильных землетрясений Монголо-Сибирского региона .....	77

Дмитриенко М.В., Кислов К.В. О перспективах применения в геофизике существующих систем мониторинга протяженных объектов .....	83
Ерохин А.М., Венедиктов К.В., Лобанов А.М., Белов А.П. Анализ естественных низко-частотных колебаний горных пород с помощью кварцевого гравиметра для решения прикладных задач геологии .....	87
Желиговский В.А. Об ослаблении нелинейности в адвективных членах у пространственно-аналитических решений уравнений магнитогидродинамики .....	92
Желиговский В.А., Чертовских Р.А. Эволюция возмущений блоховского типа пространственно-периодических магнитогидродинамических состояний.....	95
Завьялов А.Д., Зотов О.Д., Гульельми А.В., Клайн Б.И. О триадах землетрясений .....	99
Индаков Г.С., Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Матвеев М.А., Морозов Ю.А. Анализ статистических параметров акустической эмиссии при термическом воздействии на горные породы разного состава и происхождения .....	103
Кержаев А.П., Меньшова И.В. Перераспределение остаточных напряжений в результате образования разрыва.....	106
Кислов К.В., Гравиров В.В. Наиболее перспективные применения распределенного акустического зондирования (DAS) в российской геофизике.....	111
Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Смертоносные землетрясения 2023 года: неожиданные сюрпризы?.....	118
Костин В.М., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. О возможности краткосрочного предсказания сильных землетрясений по метеорологическим данным прогноза развития тропических циклонов.....	124
Куляндина А.С. Пространственная корреляция разломной структуры и распределения очагов землетрясений на территории Чекуровской антиклинали .....	129
Кухмазов А.С., Гоев А.Г. Глубинное строение среды в районе Хибинского и Ловозерского массивов (Кольский полуостров) на основе миграции данных Ps и Sp функций приемника .....	132
Левина Е.А., Ружич В.В. Формализация определения некоторых сейсмогеологических признаков подготовки землетрясения на примере Байкальской рифтовой зоны.....	136
Ливинский А.И., Горшков А.И., Новикова О.В. Распознавание потенциальных мест локализации рудных месторождений в горно-складчатых областях России на основе геолого-геофизических данных .....	141
Лобковский Л.И., Баранов А.А., Рамазанов М. Разрушение ледников Антарктиды, активизация подледного вулканизма и повышение уровня моря – как возможное следствие триггерного эффекта от деформационных волн сильнейших землетрясений в зонах субдукции юга Тихого океана .....	145
Любушин А.А., Родионов Е.А. Анализ глобальных корреляций магнитного поля Земли в связи с сильными землетрясениями .....	151
Мартышко П.С., Ладовский И.В., Цидаев А.Г., Бызов Д.Д. Построение трехмерных сейсмоплотностных моделей земной коры с использованием параллельных алгоритмов....	156

Маточкина С.Д. Проверка выполнения закона продуктивности землетрясений в условиях лабораторных экспериментов по разрушению горных пород.....	160
Михайлов В.О., Бабаянц И.П., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Смирнов В.Б. Смещения земной поверхности в области землетрясения в Турции 06.02.2023 на косейсмическом и постсейсмическом этапе и модель сейсмического разрыва по данным спутниковой радарной интерферометрии .....	165
Молокова А.П. Использование метода спектральных отношений к вулканическим землетрясениям Ключевской группы вулканов по данным эксперимента KISS .....	169
Морозов А.Н., Асминг В.Э. Метод вероятностной локации раннеинструментальных землетрясений на основе макросейсмических и инструментальных данных.....	174
Наймарк О.Б. Критическая динамика развития разрушения и автомодельные закономерности сейсмических событий .....	180
Новиков В.А., Сорокин В.М. Электромагнитные триггерные эффекты в системе «ионосфера-атмосфера-литосфера» и их возможное использование для краткосрочного прогноза землетрясений .....	185
Писаренко В.Ф., Скоркина А.А., Рукавишникова Т.А., Ружич В.В., Левина Е.А. Оценка максимальной возможной магнитуды для Байкальской рифтовой зоны.....	190
Подвигина О.М. Новый алгоритм решения задач с физическими граничными условиями методом Галеркина.....	194
Подольская Е.С., Некрасова А.К., Прохорова Т.В., Трубенков А.В., Селюцкая О.В., Горшков А.И., Новикова О.В., Кособоков В.Г. Развитие веб-ГИС проектов ИТПЗ РАН в 2021–2023 гг. ....	196
Радзиминович Н.А., Тубанов Ц.А., Санжиева Д.Б.-Д., Смекалин О.П. Сейсмотектоника и сейсмичность в районе Цаганского землетрясения 1862 года с $M = 7.5$ (дельта р. Селенги, Байкал) .....	200
Радзиминович Я.Б., Новопашина А.В., Лухнева О.Ф., Гилёва Н.А. Быстринское землетрясение 21.09.2020: новый импульс макросейсмических исследований в Восточной Сибири.....	205
Резниченко Р.А., Гоев А.Г. Результаты применения метода функций приемника для решения задач восстановления глубинного скоростного разреза в районе Авачинской бухты (Камчатка) .....	210
Родкин М.В. Новый алгоритм прогноза землетрясений – подходы и вопросы .....	215
Родкин М.В., Прохорова Т.В., Рукавишникова Т.А. Тенденция уменьшения вызванной сейсмичности при продолжительном сильном техногенном воздействии? .....	220
Розенберг В.Л. Сферическая блоковая модель динамики и сейсмичности литосферы: современное состояние и перспективы развития .....	224
Ружич В.В., Левина Е.А., Бержинская Л.П. Об использовании данных среднесрочного прогноза для Байкальской рифтовой зоны при оценках сейсмической опасности.....	229
Сафронов А.Н. Планетарные процессы как причина сильных землетрясений .....	234



Семка М.А., Горшков А.И. Геолого-геофизические особенности мест сильнейших землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса и Яванского желоба.....	236
Скоркина А.А. Спектральные характеристики записей сильных движений на примере Култукского землетрясения .....	241
Смирнов В.Б., Петрушов А.А. Стадийность проявления аномалий сейсмического режима перед землетрясениями Камчатки, Японии и Исландии .....	244
Смирнов В.Б., Петрушов А.А., Михайлов В.О. Об RTL-аномалии сейсмического режима перед землетрясением в Турции 06.02.2023 .....	248
Соловьев А.А. Геомагнитный эффект землетрясений $M_w = 7.5-7.8$ в Турции 6 февраля 2023 года .....	251
Спиридонов Е.П., Никитин С.П., Кислов К.В., Старовойт Ю.О., Бенгальский Д.М., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Предварительные результаты анализа сигналов, зарегистрированных распределенным акустическим сенсором в рамках международного эксперимента Global DAS Month.....	254
Толмачев Д.С. Численное моделирование нелинейного конвективного магнитного динамо во вращающемся плоском слое электропроводной жидкости.....	259
Филиппова А.И., Фомочкина А.С. Очаговые параметры Турецких землетрясений 6 февраля 2023 года по телесеismicким данным.....	261
Хасаева Т.Т. Численное исследование возникновения пространственных инверсий магнитного поля во внешних областях спиральных галактик .....	266
Цветков И.А., Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Эпицентры землетрясений и системы активных разломов.....	269
Чугаев А.В., Симикин Д.Е., Тезиков А.Д. Количественная оценка чувствительности оптоволоконных распределенных датчиков на основании данных межскважинного просвечивания .....	274
Юрков А.К., Козлова И.А., Бирюлин С.В. Отражение сейсмических событий в поле объёмной активности почвенного радона в различных геодинамических условиях .....	279
Dokukin P., Güvenaltin M.A., Kaftan V., Toker M. Synoptic analysis of crustal deformation with an eye on migration of the strongest earthquakes in Eastern Anatolia (Turkey) 2009–2023.....	285
Ghil M. Boolean Delay Equations and Their Application to Experimental Earthquake Prediction .....	290
Grigorian A.G., Baranov A.A. Local variations in the geomagnetic field, helium and radon concentrations in wells as possible medium- and short-term precursors of strong earthquakes using the example of Armenia .....	294
Hohage T., Novikov R.G., Sivkin V.N. Phase retrieval and phaseless inverse scattering with background information.....	298
Shanker D., Sabah N. The forecast of tsunamigenic earthquake in Asia-Oceania .....	299
Программа конференции.....	302

## **АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ СОЛОВЬЕВ: ЖИЗНЬ В НАУКЕ**

Горшков А.И.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

*E-mail: [gorshkov@mitp.ru](mailto:gorshkov@mitp.ru)*



Соловьев Александр Анатольевич родился 21 октября 1947 года в г. Москве. В 1966 году окончил школу № 135 и поступил на механико-математический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, который с отличием закончил в 1971 г. и поступил в очную аспирантуру Института прикладной математики АН СССР. В 1975 году защитил кандидатскую диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, посвященную полуаналитическим методам расчета движения искусственных спутников

Земли и Луны, а в 1991 году – диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, в которой исследована возможность генерации магнитного поля спиральным течением проводящей жидкости.

С 1976 г. до декабря 1990 г. работал в Институте физики Земли АН СССР им. О.Ю. Шмидта в отделе вычислительной геофизики под руководством В.И. Кейлиса-Борока в должности старшего научного сотрудника лаборатории прикладной математики. В 1990 году перешел на работу в Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (МИТПАН), который был создан на базе отдела вычислительной геофизики ИФЗ РАН. Впоследствии институт стал называться Институтом теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (ИТПЗ РАН). В этом институте Александр Анатольевич прошел путь от ведущего научного сотрудника до директора, которым оставался в течение почти 20 лет. В мае 2000 года был избран членом-корреспондентом РАН по Отделению геологии, геофизики, геохимии и горных наук.

С именем А.А. Соловьева связаны прежде всего фундаментальные научные исследования по изучению природы сейсмичности методами математического моделирования, распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений, а также применению математических методов для прогноза критических событий в социально-экономических системах. Им было разработано новое направление математической геофизики – математическое моделирование динамики литосферных блоков и разломов –

и получены фундаментальные результаты по изучению геодинамики и ее связи с сейсмичностью. Эти исследования позволяют решать задачу о восстановлении краевых условий и движущих тектонических сил, определяющих пространственное распределение наблюдаемой сейсмичности. Им исследована глобальная модель взаимодействия тектонических плит с учетом сферичности Земли. Эти работы впервые дали количественное объяснение связи сейсмичности с геодинамикой.

Другой актуальной задачей, которой Александр Анатольевич занимался на протяжении многих лет, было распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в сейсмоактивных регионах мира. Этот подход, основанный на связи эпицентров сильных землетрясений с местами пересечения морфоструктурных линеаментов, позволяет с помощью алгоритмов распознавания образов выявлять потенциально сейсмоопасные области, в которых могут происходить сильные землетрясения. Важнейшим вкладом в эту методологию был разработанный им статистический тест для оценки неслучайности связи эпицентров сильных землетрясений с окрестностями пересечений линеаментов. В его работах сейсмоопасные пересечения линеаментов были определены во многих сейсмоактивных регионах мира, включая Кавказ, Камчатку, горный пояс Анд, Альпы, Динариды, Апеннины, Иберийский полуостров, зону сочленения Альп и Динарид, Алтай-Саяны.

Он также внес принципиальный вклад в разработку нового направления в развитии теории сложных систем – прогноза критических событий в социо-экономических системах. Перенос подхода к прогнозу землетрясений, основанного на анализе поведения нелинейных динамических систем, на социо-экономические системы позволил прогнозировать экономические рецессии, периоды увеличения роста безработицы и скачки тяжкой преступности. Им выполнены исследования, направленные на универсальное описание ситуаций, предшествующих экстремальным событиям в сложных системах различной природы. Рассмотрение сильных землетрясений в качестве экстремальных событий в сложной системе (литосфере Земли) привело к идее поиска универсальных предвестников экстремальных событий, проявляющихся в сложных системах различного масштаба.

Среди других научных результатов А.А. Соловьева важнейшим является обнаружение возможности генерации магнитного поля течением Куэтта – Пуазейля проводящей жидкости. По этой проблеме им была защищена докторская диссертация. В самом начале научной карьеры Александр Анатольевич занимался разработкой методов расчета движения искусственных спутников Земли и других небесных тел с учетом возмущений от несферичности гравитационного поля, атмосферы и других факторов, что определило новый уровень точности в определении координат спутников.

А.А. Соловьев активно участвовал в международном научном сотрудничестве. С 1988 по 2011 г. был одним из ведущих приглашенных лекторов на международных школах по нелинейной динамике литосферы и прогнозу землетрясений, организованных Международным центром теоретической физики (г. Триест, Италия) ЮНЕСКО-МАГАТЭ для молодых ученых из развивающихся стран, а с 2007 по 2022 год был содиректором этих школ. Он входил в руководящий совет проекта «Экстремальные события: причины и последствия» 6-й рамочной программы ЕС, в котором участвовали 16 научных организаций из России, Франции, Германии, Бельгии, Италии, Великобритании, Люксембурга и Румынии.

Александр Анатольевич вел большую научно-организационную работу в качестве главного редактора журнала «Вулканология и сейсмология», заместителя председателя Диссертационного совета Д002.001.01 при Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, заместителя председателя Комитета РАН по системному анализу, члена Бюро Национального геофизического комитета, члена Национального комитета РАН по сбору и оценке численных данных в области науки и техники и Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска, а также заместителя председателя Научного совета по проблемам сейсмологии Отделения наук о Земле РАН. Он входил в состав редколлегии журнала «Физика Земли», являлся экспертом РФФИ и РНФ.

Александр Анатольевич оставил богатое творческое наследие. Им опубликовано 312 научных работ, среди которых 3 монографии, 101 статья в ведущих российских и зарубежных журналах, а также 4 авторских свидетельства.

23 сентября 2021 года Александра Анатольевича не стало. Он похоронен в Москве на Троекуровском кладбище.

## ALEXANDER SOLOVIEV – A SCIENTIST AND A MAN

Panza G.F.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Accademia Nazionale Dei Lincei, Trieste, Italy*

<sup>2</sup> *Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Trieste, Italy*

*E-mail: [giulianofpanza@fastwebnet.it](mailto:giulianofpanza@fastwebnet.it)*

I met Alexander Soloviev at the International Centre for Theoretical Physics (ICTP) after my arrival at the University of Trieste, as full prof. in Geophysics. I had the honor of working with him until the day of his untimely death in 2021. I'll concentrate on the exciting experience of working with him on ICTP research and training projects, as well as the numerous, incredibly enjoyable social gatherings, among which I'd like to specifically note the celebration of Sacha's 50th birthday. A common feature to all the projects carried out in Physics of the Solid Earth is the publication of the most important results in many of the most prestigious international scientific journals and Sacha occupies a relevant rank among Authors. The collaboration with Alexander Soloviev continued practically up to the day of his untimely death, and his seminal contribution will undoubtedly inspire future critical research aimed at reducing the likelihood of natural disasters and providing guidelines for the safe planning of industrial and urban areas.

УДК 550.34.06

## АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ АЛГОРИТМОМ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ DPS: КАМЧАТКА

Агаян А.С.<sup>1,3</sup>, Некрасова А.К.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

<sup>3</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия*

E-mail: [nastaagaian@mail.ru](mailto:nastaagaian@mail.ru), [nastia@mitp.ru](mailto:nastia@mitp.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** Представленные в докладе пилотные результаты анализа пространственной кластеризации эпицентров сейсмических событий на северо-западе Тихого океана продолжают исследование применения алгоритма топологической фильтрации (алгоритм DPS) для анализа группируемости сейсмических событий. Используются данные о землетрясениях, зарегистрированных сейсмической сетью Камчатского филиала ЕГС РАН за период с 1963 по 2022 год. Получены стабильные области кластеризованных сейсмических событий, не зависящие от временного интервала регистрации землетрясений. Эпицентры мелкофокусных землетрясений Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны разделены на южный и северный кластеры, входящие в зоны сейсмичности, принятые в КФ ЕГС. Эпицентры землетрясений промежуточной сейсмофокальной зоны не разделены алгоритмом DPS на южный и северный сегменты.

**Ключевые слова:** дискретный математический анализ, алгоритм топологической фильтрации, кластеризация, Камчатка

Алгоритм DPS анализирует способность объектов группироваться в пространстве, образуя кластеры. Взаимное пространственное распределение объектов, объединенных в кластеры, определяется как наиболее плотное на фоне плотности пространственного распределения всех объектов на рассматриваемой территории [Агаян и др., 2011; 2014]. Рассматривается взаимное пространственное положение объектов в двумерном пространстве. При анализе группируемости сейсмических событий алгоритм применяется к эпицентрам землетрясений.

Параметрами алгоритма DPS являются степень  $q$  и уровень связанности объектов  $\beta$ . При фиксированных параметрах  $q$  и  $\beta$  группы объектов, объединенные в кластеры, характеризуются  $q$ -степенным средним всех расстояний из рассматриваемого массива объектов  $R_q$  и локальной плотностью кластеров  $\alpha$ . Радиус  $R_q$  (в км) определяется в ходе работы алгоритма при заданном отрицательном значении степени  $q$  (см. уравнение (14) [Агаян и др., 2014]). Локальная плотность кластеров однозначно определяется по заданному значению уровня связанности  $\beta$  из отрезка  $[-1, 1]$  (см. уравнение (15) [Агаян и др., 2014]).

В работе использованы данные каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.) Камчатского филиала ЕГС РАН (КФ ЕГС)

<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue> [Чеброва и др., 2020]. Использовано принятое в КФ ЕГС пространственное зонирование данных Камчатского региона на зоны сейсмичности [Левина и др., 2013]. Для анализа кластеризации выбраны временные и пространственные (в том числе и по глубине) диапазоны каталога КФ ЕГС, характеризующиеся равномерным распределением представительной магнитуды  $M_{-}$ . А именно, алгоритм DPS последовательно применен к сейсмическим событиям:

- с магнитудой  $M \geq 4.4$ , зарегистрированным КФ ЕГС с 1963 по 2022 г. и двух интервалов глубин  $h \leq 70$  км и  $h \leq 380$  км;
- с магнитудой  $M \geq 3.5$ , зарегистрированным КФ ЕГС с 1996 по 2022 г.,  $h \leq 70$  км и  $h \leq 380$  км;
- мелкофокусным ( $h \leq 70$  км), с магнитудой  $M \geq 3.5$ , зарегистрированным в Южном и Северном сегменте Курило-Камчатской (К-К) сейсмофокальной зоны с 1963 по 2022 г.;
- промежуточным ( $70 < h \leq 380$  км), с магнитудой  $M \geq 3.5$ , зарегистрированным в Южном и Северном сегменте К-К сейсмофокальной зоны с 1982 по 2022 г.

Для оценки устойчивости определения пространственной кластеризации сейсмических событий, дополнительно, алгоритм DPS применен к эпицентрам мелкофокусных землетрясений в пределах Южного и Северного сегмента К-К сейсмофокальной зоны с 1982 по 2022 г. и с 1996 по 2022 г., а для промежуточных землетрясений Южного и Северного сегмента с 1996 по 2022 г.

Для каждого подкаталога оценка пространственной кластеризации выполнена при фиксированных значениях параметра  $q = -2$  и четырех значениях параметра  $\beta = \{-0.5, -0.25, 0, 0.25\}$ . Значение  $\beta = -0.5$  соответствует минимальной (для исследуемой выборки), а  $\beta = 0.25$  – максимальной степени связанности эпицентров внутри выделенных кластеров. Результаты кластеризации, а именно: число выделенных кластеров  $N$ ; процент эпицентров, вошедших в выделенные кластеры (от общего числа эпицентров при заданном пороге  $M_{-}$ ),  $n_{eq}$ ; минимальная локальная плотность эпицентров, объединенных в кластеры,  $\alpha$ ; радиус кластеризации  $R_q$  – представлены в табл. 1 и табл. 2 для всей территории регистрации КФ ЕГС и К-К сейсмофокальной зоны соответственно.

На рис. 1–4 показано пространственное распределение землетрясений, объединенных в кластеры алгоритмом DPS при  $q = -2$  и  $\beta = -0.5$ . На рис. 1 и рис. 2 представлены объединенные в кластеры эпицентры промежуточных и мелкофокусных землетрясений на всей территории регистрации КФ ЕГС, зарегистрированных с 1963 по 2022 г. с  $M \geq 4.4$  и зарегистрированных с 1996 по 2022 г. с  $M \geq 3.5$  соответственно. Отметим, что для всех

четырёх подкаталогов (табл. 1 и рис. 1, 2) алгоритм объединяет К-К сейсмофокальную зону и западный участок Командорского сегмента Алеутской дуги в единый кластер.

Таблица 1. Параметры кластеризации эпицентров сейсмических событий для территории регистрации КФ ЕГС

Параметры алгоритма DPS		Характеристики кластеризации			
$q$	$\beta$	$N$	$n_{эф}$ %	$R_q$ км	$\alpha$
<b>1963-2022, глубина <math>\leq 380</math>, <math>M \geq 4.4</math> (11478 событий)</b>					
-2	-0.5	1	77.3% (8870)	63.62	33.58
	-0.25	2	63.1% (7238)		62.83
	0	1	28.2% (3234)		102.27
	0.25	1	3.5% (405)		156.13
<b>1963-2022, глубина <math>\leq 70</math>, <math>M \geq 4.4</math> (9981 событий)</b>					
-2	-0.5	1	79.0% (7884)	57.81	31.60
	-0.25	3	59.5% (5934)		58.42
	0	1	26.7% (2661)		93.12
	0.25	1	4.0% (404)		140.04
<b>1996-2022, глубина <math>\leq 380</math>, <math>M \geq 3.5</math> (32349 событий)</b>					
-2	-0.5	3	78.8% (25501)	65.71	99.67
	-0.25	2	62.3% (20157)		181.12
	0	3	19.4% (6264)		290.36
	0.25	-	-		-
<b>1996-2022, глубина <math>\leq 70</math>, <math>M \geq 3.5</math> (27578 событий)</b>					
-2	-0.5	4	80.0% (22049)	59.35	92.23
	-0.25	2	60.5% (16688)		165.58
	0	3	15.1% (4163)		260.01
	0.25	-	-		-

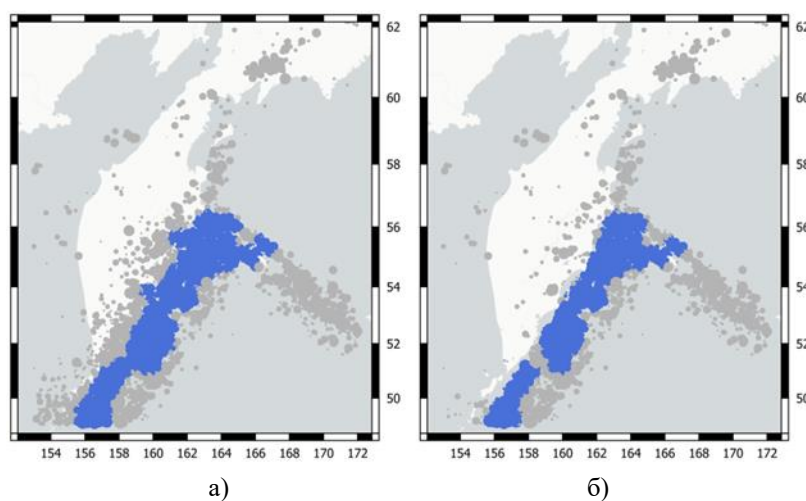


Рис. 1. Пространственное распределение эпицентров землетрясений, зарегистрированных с 1963 по 2022 г.,  $M \geq 4.4$ , объединенных в кластеры алгоритмом DPS ( $q = -2$  и  $\beta = -0.5$ ): вошедшие в кластеры – цветные символы, не вошедшие в кластеры – символы серого цвета, а)  $h \leq 380$ , б)  $h \leq 70$



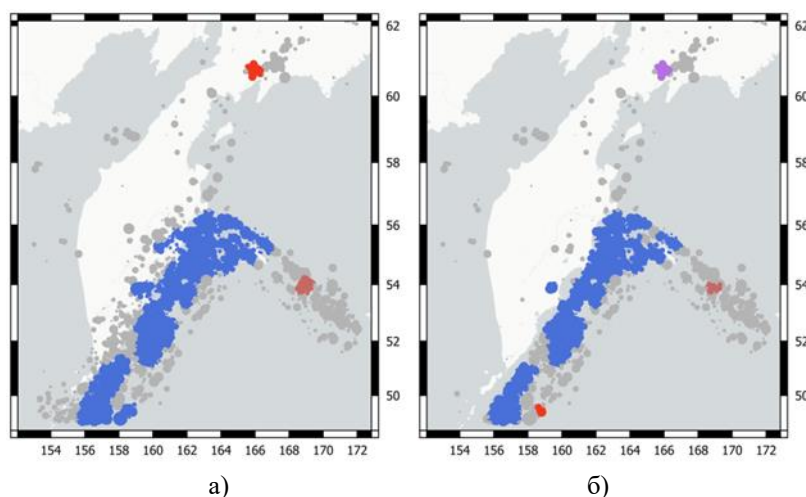


Рис. 2. Пространственное распределение эпицентров землетрясений, зарегистрированных с 1996 по 2022 г.,  $M \geq 3.5$ , объединенных в кластеры алгоритмом DPS ( $q = -2$  и  $\beta = -0.5$ ), а)  $h \leq 380$ , б)  $h \leq 70$ . Символы – аналогично рис. 1

Таблица 2. Параметры кластеризации эпицентров сейсмических событий для территории Камчатской сейсмофокальной зоны (Южный и Северный сегмент)

Параметры алгоритма DPS		Характеристики кластеризации			
$q$	$\beta$	$N$	$n_{эф}$ %	$R_q$ км	$a$
<b>1963-2022, глубина &lt; 70, <math>M \geq 3.5</math> (36714 событий)</b>					
-2	-0.5	2	81.5% (29911)	45.48	174.2
	-0.25	3	45.9% (16847)		289.7
	0	2	12.3% (4532)		432.4
	0.25	-	-		-
<b>1982-2022, глубина ≤ 70, <math>M \geq 3.5</math> (26152 событий)</b>					
-2	-0.5	2	58.9% (21607)	45.46	127.7
	-0.25	3	39.0% (14319)		211.3
	0	-	-		-
	0.25	-	-		-
<b>1996-2022, глубина ≤ 70, <math>M \geq 3.5</math> (17540 событий)</b>					
-2	-0.5	2	84.4% (14795)	44.97	86.2
	-0.25	2	49.7% (8715)		142.9
	0	-	-		-
	0.25	-	-		-
<b>1982-2022, глубина 70 - 380, <math>M \geq 3.5</math> (7194 событий)</b>					
-2	-0.5	1	79.5% (5717)	52.57	28.99
	-0.25	2	47.8 % (3436)		49.81
	0	1	17.0% (1226)		77.36
	0.25	1	12.1 % (867)		117.67
<b>1996-2022, глубина 70 - 380, <math>M \geq 3.5</math> (4684 событий)</b>					
-2	-0.5	2	77.6 % (3633)	55.92	20.63
	-0.25	2	48.1 % (2254)		34.97
	0	2	22.6 % (1057)		53.84
	0.25	-	-		-

На рис. 3 представлены эпицентры мелкофокусных землетрясений К-К сейсмофокальной зоны с  $M \geq 3.5$ , зарегистрированных с 1963 по 2022 г. (рис. 3а), с 1982 по 2022 г. (рис. 3б) и с 1996 по 2022 г. (рис. 3в), объединенных в кластеры алгоритмом DPS ( $q = -2$  и  $\beta = -0.5$ ). Аналогично, на рис. 4 представлены эпицентры промежуточных землетрясений К-К сейсмофокальной зоны с  $M \geq 3.5$ , зарегистрированных с 1982 по 2022 г. (рис. 4а) и с 1996 по 2022 г. (рис. 4б).

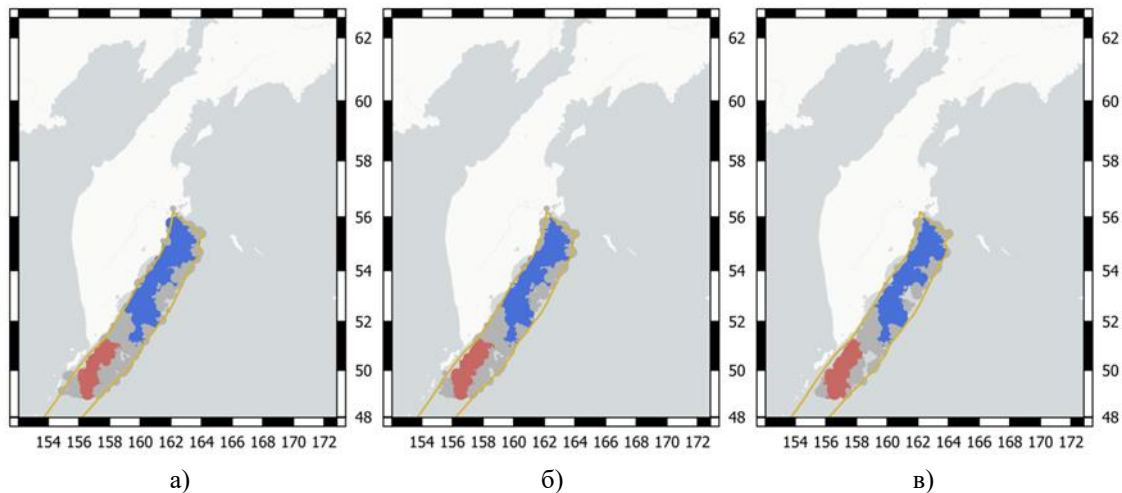


Рис. 3. Пространственное распределение эпицентров мелкофокусных землетрясений К-К сейсмофокальной зоны  $M \geq 3.5$ ,  $h \leq 70$ , объединенных в кластеры алгоритмом DPS ( $q = -2$  и  $\beta = -0.5$ ), зарегистрированных: а) с 1963 по 2022 г., б) с 1982 по 2022 г., в) с 1996 по 2022 г. Примечание: проекция границы сейсмофокальной зоны на земную поверхность показана желтой линией, символы – аналогично рис. 1

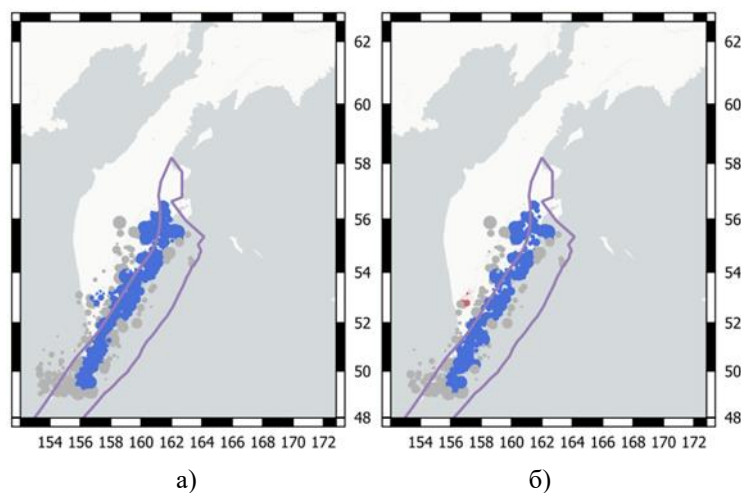


Рис. 4. Пространственное распределение эпицентров промежуточных землетрясений К-К сейсмофокальной зоны  $M \geq 3.5$ ,  $70 < h \leq 380$ , объединенных в кластеры алгоритмом DPS ( $q = -2$  и  $\beta = -0.5$ ), зарегистрированных: а) с 1982 по 2022 г., б) с 1996 по 2022 г. Примечание: проекция границы сейсмофокальной зоны на земную поверхность показана фиолетовой линией, символы – аналогично рис. 1

Отметим, что, как и для землетрясений на всей территории регистрации каталога, результат работы алгоритма DPS не зависит от временного интервала регистрации.

Мелкофокусные землетрясения К-К сейсмофокальной зоны разделены алгоритмом на два кластера. Южный кластер входит в южный сегмент К-К сейсмофокальной зоны. Северный кластер перекрывает северный сегмент и включает часть событий южного сегмента. Промежуточные землетрясения К-К сейсмофокальной зоны, для которых в КФ ЕГС также принято деление на северный и южный сегмент, не разделены алгоритмом DPS. Единый кластер эпицентров с глубиной  $70 < h \leq 380$  перекрывает область северного промежуточного и южного промежуточного сегментов К-К сейсмофокальной зоны.

### Литература

- Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Добровольский М.Н. Об одном алгоритме поиска плотных областей и его геофизических приложениях // Доклады 15-й Всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов. ММРО-15». 2011. С. 543–546.
- Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Добровольский М.Н. Дискретные совершенные множества и их применение в кластерном анализе // Кибернетика и системный анализ. 2014. Т. 50. № 2. С. 17–32.
- Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 41–64. DOI:[10.7868/s0203030613010057](https://doi.org/10.7868/s0203030613010057)
- Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеевко Е.А., Чебров Д.В. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91. DOI:[10.21455/gr2020.3-5](https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5)

## ANALYSIS OF SPATIAL CLUSTERING OF SEISMIC EVENTS BY ALGORITHM TOPOLOGICAL FILTERING DPS: KAMCHATKA

Agaian A.S.<sup>1,3</sup>, Nekrasova A.K.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

E-mail: [nastaagaian@mail.ru](mailto:nastaagaian@mail.ru), [nastia@mitp.ru](mailto:nastia@mitp.ru)

УДК 539.3

## ОСОБЕННОСТИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ МИКРОКРИСТАЛЛОВ ЦИНКА

Аглетдинов Э.А.

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

E-mail: [aeinar7@gmail.com](mailto:aeinar7@gmail.com)

(стендовый доклад)

**Аннотация.** С помощью статистических методов и методов нелинейной динамики проводится анализ сигналов акустической эмиссии, отражающих дислокационные лавины, возникающие при деформировании микрокристаллов цинка. Отмечается статистическое сходство между землетрясениями и лавинами дислокаций, возникающих при деформации микроскопических металлических образцов в микромеханических лабораторных испытаниях.

**Ключевые слова:** дислокационный ансамбль, акустическая эмиссия, самоорганизованная критичность

Дислокации – линейные дефекты кристаллической решетки, обеспечивающие скольжение атомных плоскостей при пластической деформации металлов. В последнее время было отмечено интересное статистическое сходство между землетрясениями и лавинами дислокаций, возникающих при деформации микроскопических металлических образцов в микромеханических лабораторных испытаниях [Ispánovity et al., 2022]. Коллективное поведение дислокаций вызывает большой интерес в связи с пониманием механизмов деформации, обеспечивающих диссипацию накапливаемой в материал энергии и, как следствие, последовательной перестройке микроструктуры, неизбежно заканчивающейся разрушением.

Среди современных исследовательских методов, способных отследить динамику процесса пластической деформации, выделяется метод акустической эмиссии (АЭ), получивший широкое признание благодаря своей чрезвычайно высокой чувствительности к динамике дефектного ансамбля. Акустической эмиссией называется явление возникновения механических колебаний (акустических волн) в твердых телах при быстрой диссипации энергии, запасенной кристаллической решеткой. Величина этой энергии зависит от природы источника и лежит в очень широких пределах. Излучением акустической эмиссии сопровождаются процессы пластической деформации, коррозионные процессы, фазовые превращения, поверхностные и магнитные эффекты, разрушение частиц вторичной фазы и др. Наиболее востребованной особенностью метода с точки зрения физики прочности и пластичности является практически уникальная способность АЭ отражать динамику ансамбля дефектов на различных этапах его эволюции.

В недавней работе при исследовании процессов деформации в монокристаллических микрокристаллах цинка были обнаружены степенные распределения временных интервалов

и энергий сигналов АЭ, аналогичные эмпирическим статистическим законам сейсмичности [Ispánovity *et al.*, 2022]. Такое проявление масштабной инвариантности и самоорганизации в динамике ансамбля дислокаций, по мнению авторов упомянутой работы, является признаком самоорганизованной критичности. Это концепция представляет собой обобщение моделей, демонстрирующих свойства масштабной инвариантности, склонность к катастрофическим событиям и «огрубление» свойств, обусловленных «подчинением» динамики системы коллективным переменным [Подлазов, 2005]. Масштабная инвариантность свойственна динамическим системам с детерминированным хаосом, ключевым свойством которых является экспоненциальная чувствительность к начальным условиям. Существует ряд методов анализа временных рядов, позволяющих восстановить ключевые свойства динамической системы, порождающей наблюдаемый сигнал.

В качестве материала для исследования был выбран монокристалл цинка высокой чистоты. Всего было исследовано 4 образца: 2 толщиной 32 мкм, один толщиной 16 мкм, один толщиной 8 мкм. Деформация микрокристаллов отличается от деформации массивных образцов тем, что отчетливо проявляется прерывистый характер деформации, и, кроме того, микроскопический масштаб образцов позволяет обеспечить уникальные условия регистрации сигналов АЭ, в которых скольжение дислокаций будет вызывать отчетливые всплески амплитуды, а уровень шума будет снижен.

Проводились микромеханические испытания на одноосное сжатие в вакуумной камере двухлучевого сканирующего электронного микроскопа FEI Quanta 3D. Несмотря на то, что цинк имеет ГПУ решетку, деформация была обеспечена только скольжением дислокаций за счет выбора соответствующей ориентации монокристалла, благоприятной для базисного скольжения. Механические испытания сопровождались беспороговой регистрацией сигналов акустической эмиссии. К образцу был прикреплен широкополосный пьезоэлектрический датчик PAC WSA (100–1000 кГц). Для лучшего контакта использовалась вакуумная смазка. Запись сигналов АЭ осуществлялась с помощью системы Vallen AMSY-6 при частоте дискретизации 2.5 МГц и предварительном усилении в 40 дБ.

Данные акустической эмиссии, полученные в ходе описанных экспериментов, находятся в свободном доступе [Ugi *et al.*, 2022] и использованы как исходные данные для обработки и анализа. Нелинейные системы, проявляющие детерминированный хаос и/или самоорганизованную критичность, приводят к появлению потока лавин. Регистрируемые временные ряды состоят из постоянной шумовой компоненты и выделяющимися на фоне шума всплесками, представляющими отдельные лавины. Последовательность таких всплесков или лавин иногда называют потоком событий, который математически можно представить как точечный процесс. В идеальном случае при минимальном зашумлении, а также при отсутствии наложения событий каждое событие в потоке хорошо делимо в пространстве и времени и хорошо заметно на фоне шума. Такие случаи очень редки, и на

практике на первый план выходит задача идентификации события. В связи с этим оригинальная методика подготовки исходных данных включала следующие шаги: спектральное подавление шума, детектирование событий АЭ методом функции эволюции источника [Agletdinov et al., 2020]. В результате были определены времена и амплитуды, которые характеризуют поток событий АЭ. Анализ потока событий проводился с целью установить характерные особенности нелинейного поведения и включал: исследование распределений энергий и времен ожидания, поиск странного аттрактора алгоритмом Грассбергера – Прокаччия, вычисление максимального показателя Ляпунова [Rosenstein et al., 1993], проверку гипотезы о стохастическом процессе с помощью суррогатных данных, проверку гипотезы о нелинейности тестами Тerasвирты, Тсяя, и Кинана [Terasvirta et al., 1993; Tsay, 1986; Keenan, 1985].

Распределение амплитуд задетектированных событий носит степенной характер, что подтверждают тесты проверки гипотезы о степенном распределении методом бутстрэпа [Gillespie, 2014]. Временные интервалы между последующими событиями имеют гамма распределение, что согласуется с моделью последовательности афтершоков эпидемического типа, используемой в сейсмологии [Ogata, 1988]. Гамма распределение включает в себя независимое поведение редких событий и коррелированный поток афтершоков в пределах одной лавины. В качестве исходного временного ряда для анализа методами нелинейной динамики был взят ряд временных интервалов между последующими событиями АЭ. В результате применения алгоритма Грассбергера – Прокаччия для образцов диаметров 8 и 16 мкм была обнаружена линейная зависимость корреляционной размерности от размерности вложения, что указывает на отсутствие хаотической динамики (рис. 1). Определение показателя Ляпунова по поведению структурной функции подтверждает этот результат. Структурная функция сильно флуктуирует, невозможно выделить линейный участок, что свидетельствует об отрицательном показателе Ляпунова. Для двух образцов диаметром 32 мкм, напротив, было обнаружено насыщение корреляционной размерности от размерности вложения и положительный максимальный показатель Ляпунова, что свидетельствует о хаотической динамике в данном случае. Линейная зависимость корреляционной размерности от размерности вложения может означать не только шумовую случайную природу сигнала, но и многомерную нелинейную систему типа СОК. Упомянутые ранее тесты проверки гипотезы о случайности временного ряда для всех образцов показали р-значения близкие к нулю. Это означает, что анализируемые потоки АЭ действительно являются нелинейными временными рядами, что в совокупности со степенным законом распределения амплитуд подтверждает гипотезу о самоорганизованной критичности. Другим необходимым условием СОК является стационарность скорости потока лавин. Результаты расширенного теста Дики – Фуллера отвергают гипотезу о нестационарности потока АЭ.

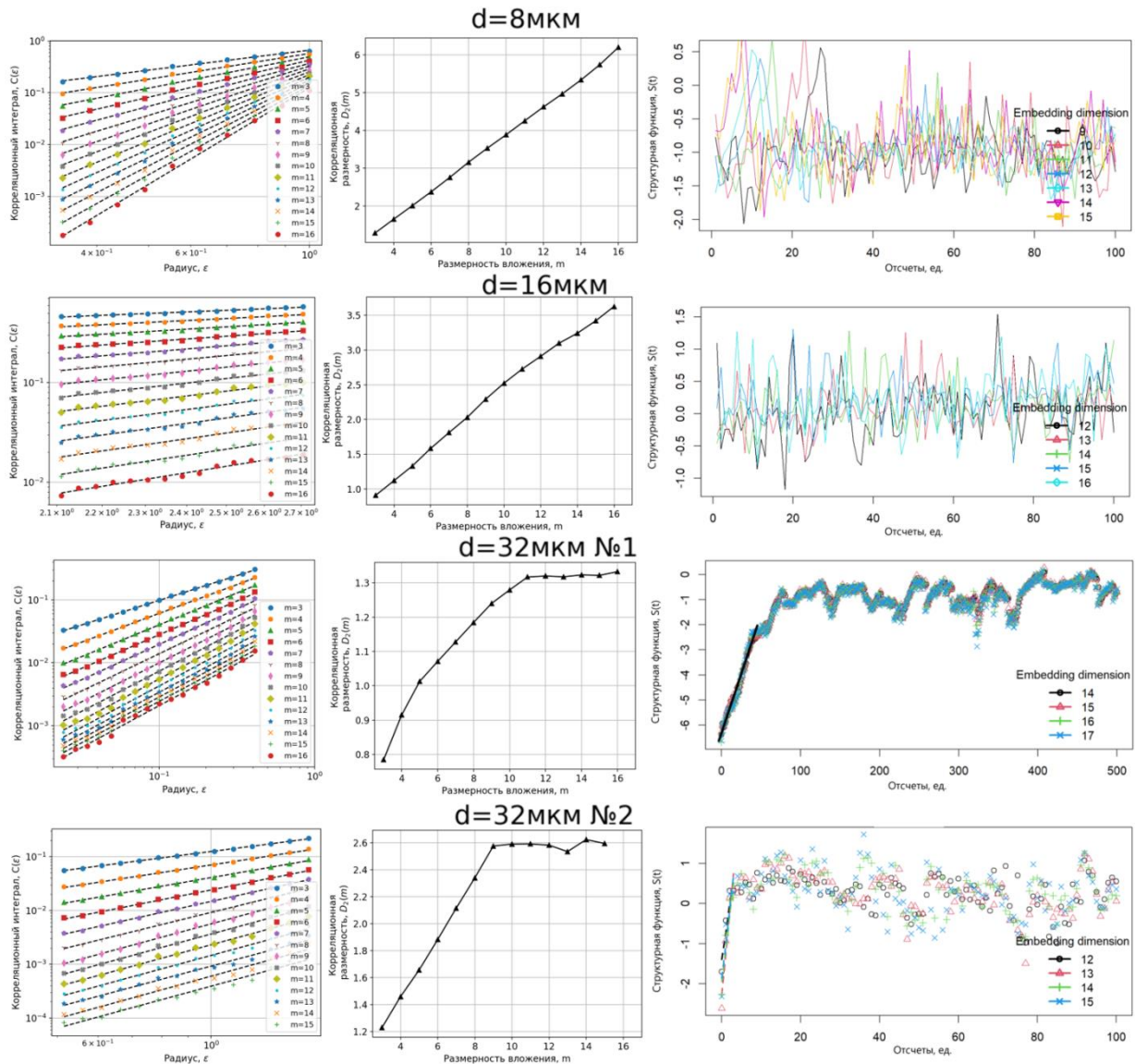


Рис. 1. Результаты применения методов нелинейной динамики к сигналам АЭ, зарегистрированным при деформировании микрокристаллов цинка. Для первого и второго образцов зависимость корреляционной размерности от размерности вложения линейна, отсутствие линейного участка на зависимости структурной функции от времени говорит об отрицательном максимальном показателе Ляпунова, детерминированный хаос не обнаружен. Для образцов диаметром 32 мкм корреляционная размерность выходит на насыщение при увеличении размерности вложения, удается выделить линейный участок на графике структурной функции от времени, максимальный показатель Ляпунова положительный, что соответствует динамическому хаосу

Таким образом, было установлено, что поток АЭ при деформировании микрокристаллов цинка имеет степенное распределение амплитуд, что является проявлением масштабной инвариантности дислокационного ансамбля. Применение методов нелинейной динамики показало, что скольжение дислокаций проявляет свойства низкоразмерного детерминированного хаоса только в случае образцов диаметром 32 мкм. На данном этапе исследования не ясна причина обнаруженного размерного эффекта. Не следует исключать возможности не верной интерпретации результатов алгоритма Грассбергера – Прокаччия, ведь в случае некоторых стохастических процессов возможен ложный выход

корреляционной размерности на насыщение. В то же время исследуемые потоки не являются стохастическими случайными процессами, как показали результаты тестов нелинейности. Скейлинг амплитуд потока АЭ в совокупности с нелинейностью и стационарностью потока АЭ позволяет предположить, что дислокационный ансамбль, формирующий линии скольжения в процессе деформации микрокристаллов, проявляет свойства многомерных нелинейных систем, обладающих свойством самоорганизованной критичности.

*Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда № 22-72-00117.*

### **Литература**

- Подлазов А.В.* Теория самоорганизованной критичности – наука о сложности // Будущее прикладной математики / Под. ред. Г.Г. Малинецкого. М.: Эдиториал УРСС, 2005. С. 404–426.
- Agletdinov E., Merson D., Vinogradov A.* A New Method of Low Amplitude Signal Detection and its Application in Acoustic Emission // Applied Sciences. 2020. V. 10. No 1. Article 73. DOI:[10.3390/app10010073](https://doi.org/10.3390/app10010073)
- Gillespie C.* Fitting Heavy Tailed Distributions: The poweRlaw Package // Journal of Statistical Software. 2014. V. 64. No 2. P. 1–16. DOI:[10.18637/jss.v064.i02](https://doi.org/10.18637/jss.v064.i02)
- Ispánovity P.D., Ugi D., Péterffy G. et al.* Dislocation avalanches are like earthquakes on the micron scale // Nature Communication. 2022. V. 13. Article 1975. DOI:[10.1038/s41467-022-29044-7](https://doi.org/10.1038/s41467-022-29044-7)
- Keenan D.M.* A Tukey nonadditivity-type test for time series Nonlinearity // Biometrika. 1985. V. 72. No 1. P. 39–44. DOI:[10.1093/biomet/72.1.39](https://doi.org/10.1093/biomet/72.1.39)
- Ogata Y.* Statistical model for earthquake occurrence and residual analysis for point processes // Journal of the American Statistical Association. 1988. V. 83. No 401. P. 9–27. DOI:[10.1080/01621459.1988.10478560](https://doi.org/10.1080/01621459.1988.10478560)
- Rosenstein M.T., Collins J.J., De Luca C.J.* A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1993. V. 65. No 1–2. P. 117–134. DOI:[10.1016/0167-2789\(93\)90009-P](https://doi.org/10.1016/0167-2789(93)90009-P)
- Terasvirta T., Lin C., Granger C.* Power of the Neural Network Linearity Test // Journal of Time Series Analysis. 1993. V. 14. No 2. P. 209–220. DOI:[10.1111/j.1467-9892.1993.tb00139.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9892.1993.tb00139.x)
- Tsay R.S.* Nonlinearity test for time series // Biometrika. 1986. V. 73. No 2. P. 461–466. DOI:[10.1093/biomet/73.2.461](https://doi.org/10.1093/biomet/73.2.461)
- Ugi D., Knapek M., Ispánovity P.D.* Experimental data related to publication: "Dislocation Avalanches: Earthquakes on the MicronScale" [Data set]. Zenodo. 2022. DOI:[10.5281/zenodo.5897653](https://doi.org/10.5281/zenodo.5897653)

## **FEATURES OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS DURING DEFORMATION OF ZINC MICROCRYSTALS**

Agletdinov E.A.

*Togliatti state university, Togliatti, Russia*

*E-mail: [aeinar7@gmail.com](mailto:aeinar7@gmail.com)*



УДК 550.343.6

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ОБВОДНЕННОСТИ СРЕДЫ НА МАГНИТУДУ СИЛЬНЕЙШЕГО АФТЕРШОКА НА ПРИМЕРЕ ХИБИНСКОГО МАССИВА

Баранов С.В.<sup>1</sup>, Моторин А.Ю.<sup>1,2</sup>, Жукова С.А.<sup>1,3</sup>, Шебалин П.Н.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Кольский филиал Федерального исследовательского центра  
«Единая геофизическая служба РАН», г. Апатиты, Россия

<sup>2</sup> Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Россия

<sup>3</sup> Горный институт ФИЦ Кольского НЦ РАН, г. Апатиты, Россия

<sup>4</sup> Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия

E-mail: [bars.vl@gmail.com](mailto:bars.vl@gmail.com)

(устный доклад)

**Аннотация.** Рассматривается воздействие обводненности среды на магнитуду сильнейшего афтершока. Исходные данные – результаты многолетнего сейсмического мониторинга и наблюдений за водопритоками на месторождениях в Хибинском массиве. Выявлено незначительное воздействие уровня обводненности среды на среднюю разность магнитуд сильнейшего афтершока и основного толчка, определяемую динамическим законом Бота. Также выявлено воздействие обводненности на продуктивность природно-техногенной сейсмичности Хибин.

**Ключевые слова:** магнитуда сильнейшего афтершока, динамический закон Бота, обводненность среды, Хибинский массив

При оценке постсейсмической опасности важной характеристикой является магнитуда ожидаемого сильнейшего афтершока  $M_1$ . В 1965 г. М. Бот [Bath, 1965] обнаружил, что средняя разность магнитуд основного толчка и сильнейшего афтершока не зависит от магнитуды основного толчка ( $M_m$ ) и примерно равна 1.1 (закон Бота). Впоследствии было предпринято множество попыток теоретически объяснить это среднее значение. Подробный обзор литературы по этой теме приведен в работе [Baranov et al., 2022].

В последующих исследованиях [Баранов, Шебалин, 2018; 2019; Baranov et al., 2022], опираясь на законы Гутенберга – Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944], продуктивности землетрясений [Shebalin et al., 2020; Baranov et al., 2022], удалось получить распределение логистического типа случайной величины  $M_1 - M_m$ , математическое ожидание которой равно примерно  $-1.1$ . Учет затухания параметра распределения продуктивности землетрясений (среднее число событий, инициированных более ранним событием-триггером) по закону Омори – Утсу [Utsu et al., 1995] позволил обобщить полученное распределение величины  $M_1 - M_m$  с учетом фактора времени – динамический закон Бота.

Мода, медиана и математическое ожидание динамического закона Бота совпадают и имеют вид [Baranov et al., 2022]:

$$E_{db}[M_1(t, T) - M_m] = \text{Mode}[M_1(t, T) - M_m] = -\Delta M + \frac{1}{b} \lg(\Lambda_{\Delta M}) + \frac{1}{b} \lg \left( \frac{D(t, T; c, p)}{D(0, T; c, p)} \right). \quad (1)$$

Здесь  $M_1(t, T)$  – магнитуда сильнейшего афтершока на интервале времени  $(t, T)$ ;  $\Lambda_{\Delta M}$  – параметр закона продуктивности землетрясений (среднее число событий с магнитудой  $M \geq M_m - \Delta M$ , инициированных более ранним землетрясением с магнитудой  $M_m$ );  $b$  – наклон графика повторяемости;  $c, p$  – параметры закона Омори – Утсу. Первые два слагаемых в формуле (1) задают среднюю разность магнитуды сильнейшего афтершока и основного толчка, а третье слагаемое определяет, как эта разность убывает с течением времени.

Цель данной статьи – выяснить, влияет ли обводненность среды на среднее значение разности магнитуд основного толчка и сильнейшего афтершока (1). Район исследования – южная часть Хибинского массива, расположенного в центре Кольского полуострова и представляющего собой крупнейшую щелочную интрузию. Сейсмичность Хибинского массива носит природно-техногенный характер и обусловлена как его тектоническим строением [Arzamastsev et al., 2013; Shabarov et al., 2021], так и горнодобывающей активностью [Kozyrev et al., 2022].

На месторождениях Хибинского массива с конца 1980-х годов проводится сейсмический мониторинг. В настоящее время сеть состоит из 60 трехкомпонентных сейсмических датчиков с частотой дискретизации входных сигналов 1000 Гц (рис. 1) и позволяет определять гипоцентры сейсмических событий с энергией  $E = 10^3$  Дж с точностью до 25 м в зоне повышенной точности и до 100 м в районе уверенной регистрации [Корчак и др., 2014]. Магнитуда представительной регистрации  $M_c = 0$ . Эпицентры землетрясений с  $M \geq 1.5$  и район исследования показаны на рис. 1.

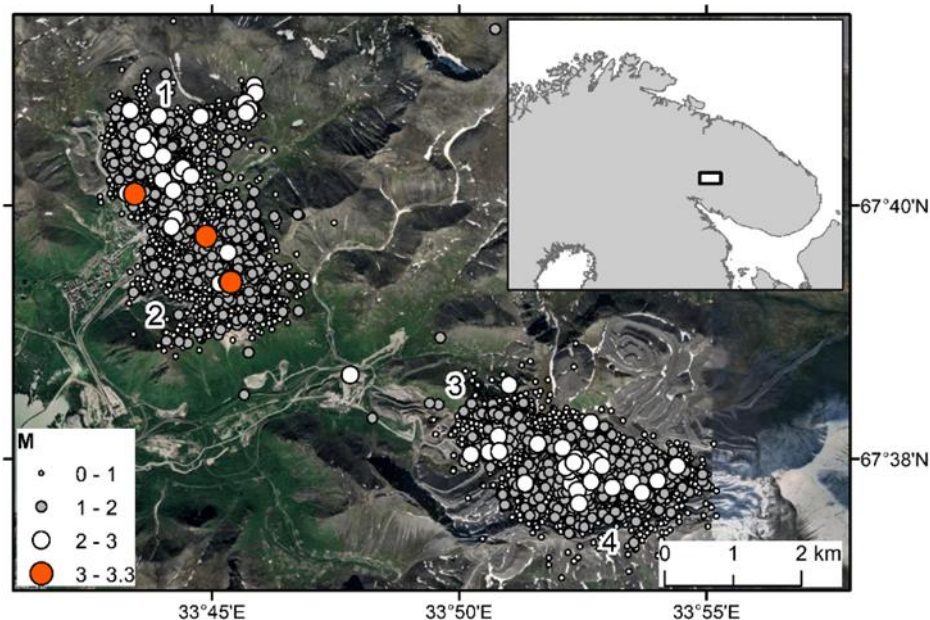


Рис. 1. Эпицентры сейсмических событий с  $M \geq 1.5$ , зарегистрированных на месторождениях Хибинского массива за период 2002–2022 гг. Цифрами показаны месторождения: 1 – Кукисвумчоррское, 2 – Юкспорское (отрабатывает Кировский рудник); 3 – Апатитовый Цирк (Расвумчоррский рудник); 4 – Плато Расвумчорр (до 2014 г. Центральный, в настоящее время – Восточный рудник). Прямоугольником на вставке обозначено местоположение района исследований

С 2002 г. на месторождениях Хибин проводится мониторинг водопритоков. Замеры осуществляются на подземных рудниках один раз в сутки, а на карьере Центральный – 2 раза в сутки. Глубины, на которых производятся измерения, сопоставимы с глубинами сейсмических событий. Неустойчивый и сезонный характер водопритока в районе исследований (резкое возрастание в мае-июне, затем спадание) [Труды..., 1965] является фактором, значимо влияющим на сейсмичность [Козырев и др., 2021; Zhukova et al., 2023].

Выделение событий-триггеров и инициированных ими толчков осуществлялось по методу ближайшего соседа [Zaliapin, Ben-Zion, 2016]. Подробно применение этого метода к природно-техногенной сейсмичности Хибин рассмотрено в работе [Баранов и др., 2020], где было показано выполнение закона продуктивности. В работе [Motorin, Baranov, 2022] показано выполнение динамического закона Бота для района исследований.

В этой статье мы оценивали параметры динамического закона Бота при различном уровне обводненности среды и рассчитывали величину  $E_{db}[M_1(t,T) - M_m]$  по формуле (1). При этом за события-триггеры принимались землетрясения с  $M_m \geq 1.5$ .

Расчет значений параметра продуктивности  $\Lambda_{1.5}$  (среднее число событий с  $M \geq M_m - 1.5$ ) показал значимое значение этого параметра в мае и сентябре по сравнению с остальными месяцами года. В мае, сентябре  $\Lambda_{1.5} = 3.9$  (3.17, 4.66), в остальные месяцы  $\Lambda_{1.5} = 2.1$  (1.78, 2.35); значение для всего периода [Баранов и др., 2020]  $\Lambda_{1.5} = 2.7$  (2.404, 3.011). В скобках указан 95% доверительный интервал.

Рост продуктивности связан с возрастанием водопритока, обусловленного резким таянием накопившегося за зиму снега. Возрастание уровня обводненности среды изменяет напряженно-деформированное состояние массива с разломными структурами и приводит к увеличению реакции среды на возмущения из-за снижения трения между бортами разломов и трещин за счет увеличения порового давления и эффекта «смазки». Этот процесс проявляется в росте сейсмической активности [Zhukova et al., 2023] и увеличении продуктивности сейсмических событий.

Для оценки параметров законов Гутенберга – Рихтера и Омори – Утсу использовался подход работ [Shebalin, Narteau, 2017; Баранов, Шебалин, 2018]. Все инициированные события объединялись в единый набор, магнитуды событий заменялись относительными магнитудами  $M_a = M - M_m$ , а времена отсчитывались относительно основных толчков. События в наборе упорядочивались по возрастанию времен. Подробно методика оценки описана в работе [Motorin, Baranov, 2022]

Оценки, полученные по набору инициированных толчков (табл. 1), показывают, что доверительные интервалы оценок существенно перекрываются и значимого воздействия обводненности среды на параметры законов Гутенберга – Рихтера и Омори – Утсу не наблюдается. Следовательно, средняя разность магнитуд основного толчка и сильнейшего

афтершока определяется продуктивностью. Но поскольку в формуле (1) продуктивность находится под логарифмом, то ее влияние будет незначительно.

Таблица 1. Оценки параметров постсейсмической активности в мае и сентябре, в остальные месяцы года и за весь период, полученные по единому набору инициированных событий (в скобках указаны 95% доверительные интервалы)

Параметр	Месяцы 5, 9	Месяцы 1-4, 6-8, 10-12	Все месяцы
$b$	1.16 (1.021, 1.302)	1.22 (1.091, 1.356)	1.19 (1.096, 1.288)
$c$	0.01 (0.003, 0.021)	0.017 (0.006, 0.023)	0.013 (0.005, 0.0210)
$p$	1.25 (1.162, 1.345)	1.28 (1.200, 1.369)	1.22 (1.164, 1.276)
$\Lambda_{1.5}$	3.87 (3.168, 4.659)	2.06 (1.781, 2.349)	2.7 (2.404, 3.011)

Действительно, если подставить найденные оценки (табл. 1) в формулу (1), то мы получим, что отличие значений величины  $E_{ab}[M_1(t,T) - M_m]$ , рассчитанных по формуле (1) для мая, сентября и остальных месяцев года составляет 0.1 по магнитуде и согласуется с фактическими данными (табл. 2). Убывание по времени величины  $E_{ab}[M_1(t,T) - M_m]$  не зависит от уровня обводненности, поскольку определяется значениями параметров закона Омори – Утсу, которые близки.

Таблица 2. Теоретические и наблюдаемые значения средней разности магнитуд сильнейшего афтершока и основного толчка, полученные по формуле (1) для мая, сентября, остальных месяцев года и всего периода

$E[M_1 - M_m]$	Месяцы 5, 9	Месяцы 1-4, 6-8, 10-12	Все месяцы
Оценка	-1	-1.2	-1.1
Набл. значение	-1	-1.3	-1.2

Статья подготовлена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-27-20125).

### Литература

- Баранов С.В., Жукова С.А., Корчак П.А., Шебалин П.Н. Продуктивность техногенной сейсмичности // Физика Земли. 2020. № 3. С. 40–51. DOI: [10.31857/S0002333720030011](https://doi.org/10.31857/S0002333720030011)
- Баранов С.В., Шебалин П.Н. Закономерности пост-сейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. М.: РАН, 2019. 218 с.
- Баранов С.В., Шебалин П.Н. О прогнозировании афтершоковой активности. 3. Динамический закон Бота // Физика Земли. 2018. № 6. С. 129–136. DOI: [10.1134/S0002333718060029](https://doi.org/10.1134/S0002333718060029)
- Козырев А.А., Жукова С.А., Батугин А.С. О влиянии обводненности массива на его сейсмическую активность при разработке апатитовых месторождений Хибин // Горный журнал. 2021. С. 31–36. DOI: [10.17580/gzh.2021.01.06](https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.06)
- Корчак П.А., Жукова С.А., Меньшиков П.Ю. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит» // Горный журнал. 2014. № 10. С. 42–46.
- Труды Государственного научно-исследовательского института горнохимического сырья, выпуск 10, Хибинские апатитовые месторождения. Вопросы структуры, гидрогеологии и методики разведки / Под ред. Б.М. Гиммельфарба, Г.М. Вировлянского, А.А. Шугина. М.: Недра, 1965. 315 с.

- Arzamastsev A.A., Arzamastseva L.V., Zhirova A.M., Glaznev V.N. Model of formation of the Khibiny-Lovozero ore-bearing volcanic-plutonic complex // *Geology of Ore Deposits*. 2013. V. 55. P. 341–356. DOI:[10.1134/S1075701513050024](https://doi.org/10.1134/S1075701513050024)
- Baranov S.V., Narteau C., Shebalin P.N. Modeling and Prediction of Aftershock Activity // *Surveys in Geophysics*. 2022. V. 43. P. 437–448. DOI:[10.1007/s10712-022-09698-0](https://doi.org/10.1007/s10712-022-09698-0)
- Bath M. Lateral inhomogeneities in the upper mantle // *Tectonophysics*. 1965. V. 2. P. 483–514.
- Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of Earthquakes in California // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1944. V. 34. P. 185–188.
- Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. Factors of seismic behavior change and localization of hazardous zones under a large-scale mining-induced impact // *Russian Mining Industry*. 2022. V. 6. P. 95–102. DOI:[10.30686/1609-9192-2022-6-95-102](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102)
- Motorin A., Baranov S. Distribution of Strongest Aftershock Magnitudes in Mining-Induced Seismicity // *Frontiers of Earth Science*. 2022. V. 10. Article 902812. DOI:[10.3389/feart.2022.902812](https://doi.org/10.3389/feart.2022.902812)
- Shabarov A.N., Kuranov A.D., Kiselev V.A. Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite-nepheline ores // *Eurasian Mining*. 2021. V. 36. No 2. P. 3–7. DOI:[10.17580/em.2021.02.01](https://doi.org/10.17580/em.2021.02.01)
- Shebalin P., Narteau C. Depth Dependent Stress Revealed by Aftershocks // *Nature Communications*. 2017. V. 8. DOI:[10.1038/s41467-017-01446-y](https://doi.org/10.1038/s41467-017-01446-y)
- Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V. Earthquake Productivity Law // *Geophysical Journal International*. 2020. V. 222. P. 1264–1269. DOI:[10.1093/gji/ggaa252](https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252)
- Utsu T., Ogata Y., Matsu'ura R.S. The Centenary of the Omori Formula for a Decay Law of Aftershock Activity // *Journal of Physics of the Earth*. 1995. V. 43. No 1. P. 1–33. DOI:[10.4294/jpe1952.43.1](https://doi.org/10.4294/jpe1952.43.1)
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. A global classification and characterization of earthquake clusters // *Geophysical Journal International*. 2016. V. 207. P. 608–634. DOI:[10.1093/gji/ggw300](https://doi.org/10.1093/gji/ggw300)
- Zhukova S.A., Motorin A.Yu., Baranov S.V. Influence of Watering of Khibiny Mountains on the Earthquake-Size Distribution // *Problems of Geocosmos—2022, Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. 2023. DOI:[10.1007/978-3-031-40728-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-40728-4_12)

## INFLUENCE OF WATERING ON THE STRONGEST AFTERSHOCK MAGNITUDE IN Khibiny MOUNTAINS

Baranov S.V.<sup>1</sup>, Motorin A.Yu.<sup>1,2</sup>, Zhukova S.A.<sup>1,3</sup>, Shebalin P.N.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Kola Branch of GS, RAS, Apatity, Russia

<sup>2</sup> Kirovsk Branch of Apatit, Kirovsk, Russia

<sup>3</sup> Mining Institute of Kola Science Centre, RAS, Apatity, Russia

<sup>4</sup> Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia

E-mail: [bars.vl@gmail.com](mailto:bars.vl@gmail.com)

УДК 550.343.6

## МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 5 МАРТА 2022 ГОДА С $M_L = 3.7$ В ХИБИНСКОМ МАССИВЕ

Баранов С.В.<sup>1</sup>, Федоров А.В.<sup>1</sup>, Моторин А.Ю.<sup>1,2</sup>,  
Асминг В.Э.<sup>1</sup>, Федоров И.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кольский филиал Федерального исследовательского центра  
«Единая геофизическая служба РАН», г. Апатиты, Россия

<sup>2</sup> Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Россия

E-mail: [bars.vl@gmail.com](mailto:bars.vl@gmail.com)

(устный доклад)

**Аннотация.** Рассматривается макросейсмический эффект природно-техногенного землетрясения с магнитудой  $M_L = 3.7$  ( $M_b = 4.4$ ), произошедшего 05.03.2022 в восточной части Хибинского массива. Оценка макросейсмического эффекта в населённых пунктах выполнялась по данным онлайн анкетирования. Интенсивности (по шкале MSK-64), оценённые по анкетам, сопоставляются со значениями, полученными по уравнению макросейсмического поля Шебалина.

**Ключевые слова:** Хибинский массив, природно-техногенное землетрясение 05.03.2022, макросейсмический эффект

05 марта 2022 г. в 00:13:27 UTC в восточной части Хибинского массива (67.670° с.ш., 34.156° в.д.) произошло землетрясение с магнитудой  $M_L = 3.7$  ( $M_b = 4.4$  по данным Службы срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН и USGS). Данное землетрясение является вторым по силе на территории Хибинского массива с 1956 г. (начало инструментальных сейсмологических наблюдений на Кольском полуострове) и сильнейшим за период цифровой регистрации с 1992 г. В период с 1905 по 1956 г. сведения о более сильных землетрясениях на территории Хибинского массива отсутствуют.

Для изучения макросейсмических проявлений от землетрясений на главной странице сайта КоФ ФИЦ ЕГС РАН имеется ссылка на анкету-опросник<sup>1</sup>, при заполнении которой анкетирруемому необходимо отметить ощущаемый им эффект. После ощутимого землетрясения в средства массовой информации региона рассылается информационное сообщение с просьбой заполнить анкету.

После землетрясения 05.03.2022 на сайте Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН была заполнена 41 анкета, 3 из которых были отбракованы, так как не было указано место, где находился анкетирруемый во время землетрясения. Всего были обработаны 38 анкет. Эта информация позволила оценить макросейсмический эффект этого события в баллах шкалы MSK-64 (табл. 1) и сопоставить его с теоретическими значениями, полученными по уравнению макросейсмического поля Блейка – Шебалина [Shebalin, 1972; Шебалин, 2003]:

$$I = 1.5M - 3.5 \lg \sqrt{d^2 + h^2} + 3. \quad (1)$$

<sup>1</sup>Опросник <http://www.krsc.ru/?q=ru/questionnaire>

Здесь  $I$  – интенсивность сейсмического воздействия в баллах шкалы MSK–64;  $M$  – магнитуда землетрясения;  $d$  – расстояние до эпицентра (км);  $h$  – глубина гипоцентра (км). Числовые константы в формуле (1) в общем случае зависят от региона, однако здесь использованы среднемировые значения. Возможность применения среднемировых значений для землетрясений Балтийского щита показана в работе [Петрова и др., 2020]. При расчете интенсивности по формуле (1) принималось:  $M = 3.7$ , координаты эпицентра  $67.668^\circ$  с.ш.,  $34.151^\circ$  в.д., глубина от дневной поверхности 0.6 км.

Таблица 1. Макросейсмический эффект (интенсивность в баллах шкалы MSK–64) от землетрясения 05.03.2022 на горнообогатительном комбинате (ГОК) «Олений ручей» и в некоторых населенных пунктах Мурманской области. ( $d$  – расстояние от населенного пункта до эпицентра землетрясения, км;  $I_a$  – интенсивность, полученная по анкетам;  $I$  – интенсивность, рассчитанная по формуле (1).)

Населенный пункт	Число анкет	Широта	Долгота	$d$ , км	$I_a$	$I$
ГОК, «Олений ручей»	1	67.686	34.200	2.7	VI	7.0
пос. Коашва	10	67.609	34.179	7	V	5.6
мкр. Кукисвумчорр	2	67.660	33.717	19	IV	4.1
г. Кировск	24	67.612	33.643	23	IV	3.8
пос. Титан	0	67.561	33.632	25		3.6
пос. Ревда	0	67.929	34.539	33		3.2
г. Апатиты	1	67.565	33.398	34	III	3.2
село Ловозеро	0	67.998	35.020	52		2.6
г. Мончегорск	0	67.920	32.899	60		2.3
г. Оленегорск	0	68.129	33.241	64		2.2
КАЭС	0	67.465	32.482	75		2.0

Сопоставление интенсивностей сейсмического воздействия, полученных по анкетам и рассчитанных по формуле Блейка – Шебалина (1), показало хорошее соответствие этих величин. Этот результат является подтверждением корректности применения формулы (1) для оценки макросейсмических проявлений на территории Мурманской области.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436>, <http://www.gsras.ru/unu/>).*

### Литература

Петрова Н.В., Дягилев Р.А., Габсатарова И.П. Особенности затухания сейсмического эффекта землетрясений Русской платформы и Урала // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 4. С. 5–25. DOI:[10.21455/VIS2020.4-1](https://doi.org/10.21455/VIS2020.4-1)

- Шебалин Н.В.* Количественная макросейсмика (фрагменты незавершённой монографии).  
Проблемы макросейсмики // Вычислительная сейсмология. 2003. Вып. 34. С. 57–201.
- Shebalin N.V.* Macro seismic data as information on source parameters of large earthquakes // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1972. V. 6. No 4. P. 316–23.  
DOI:[10.1016/0031-9201\(72\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(72)90016-7)

## MACROSEISMIC EFFECT OF THE EARTHQUAKE ON MARCH 5, 2022 WITH $M_L=3.7$ IN THE Khibiny Massif

Baranov S.V.<sup>1</sup>, Fedorov A.V.<sup>1</sup>, Motorin A.Yu.<sup>1,2</sup>, Asming V.E.<sup>1</sup>, Fedorov I.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kola Branch of GS RAS, Apatity, Russia

<sup>2</sup> Kirovsk Branch of Apatit, Kirovsk, Russia

E-mail: [bars.vl@gmail.com](mailto:bars.vl@gmail.com)



УДК 550.34:711.1:699.841

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИРКУТСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ С ПОЗИЦИЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА

Бержинская Л.П.<sup>1,2</sup>, Иванова Н.В.<sup>1,2</sup>, Левина Е.А.<sup>1</sup>, Ружич В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*

<sup>2</sup> *Иркутский национальный исследовательский технический университет  
(ИРНИТУ), г. Иркутск, Россия*

*E-mail: [Berj.LP@yandex.ru](mailto:Berj.LP@yandex.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** Рассматривается возможность взаимного пространственного развития Иркутской агломерации с позиций сейсмического риска каждого из населенных пунктов урбанизированной территории. Социально-экономические показатели риска говорят о необходимости постоянного планомерного проведения превентивных мероприятий для повышения общего уровня сейсмобезопасности и дальнейшего процесса территориально-экономического взаимодействия.

**Ключевые слова:** агломерация, сейсмическая опасность, показатели сейсмического риска

Ориентация страны на инновационную экономику и происходящие в связи с этим интенсивные трансформационные процессы приводят к новой форме территориальной организации экономического пространства – агломерациям. Предполагается, что создание агломераций станет тем стратегическим направлением пространственного развития, которое позволит создать в стране опорный каркас системы управления регионами, а внутри каждой из них обеспечит взаимное развитие территорий, входящих в агломерацию.

Еще в 2008 году Распоряжением Правительства РФ № 1662-р от 17.11.2008 г. была утверждена «Концепция долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2020 г.», в которой агломерации названы точками роста, своеобразными катализаторами развития российской экономики. В Указе Президента РФ №13 от 16.01.2017 г. «Основы государственной политики регионального развития РФ на период до 2025 г.» говорится, что для дальнейшего процесса преобразования «...обеспечения экономического роста, научно-технологического развития, повышение инвестиционной привлекательности и конкурентной способности российской экономики на мировых рынках» необходимо создание крупных городских агломераций [<https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71487690/>].

Наиболее полное понятие термина «агломерация» дано в работе Е.Н. Перцика [Перцик, 2009] – «система территориально сближенных и экономически взаимосвязанных населенных мест, объединенных устойчивыми трудовыми, культурно-бытовыми и производственными связями, общей социальной и технической инфраструктурой. Это качественно новая форма расселения.... особый продукт современной урбанизации».

Конечно, специфика российских регионов вносит существенные ограничения в процесс развития агломераций – это и недостаточное количество и различия экономического потенциала крупных центров, способных стать точками роста, и пространственная изолированность многих региональных городов из-за неразвитой транспортной системы, и значительная разреженность расселения в большинстве российских регионов [Горяченко и др., 2011]. Дополнительным негативным фактором при ускоренном создании агломераций может стать еще большее опустошение многих населенных пунктов в связи с переездом жителей в крупные города и в зоны транспортных магистралей. В мировой практике накоплен опыт создания форм и моделей управления агломерациями, но нет той универсальной схемы, пригодной для прямого переноса к российским условиям. Агломерация – это не просто административная единица, полученная в результате слияния территорий с целью оптимизации управления ограниченными ресурсами, а сложная социально-экономическая и территориальная система, базирующаяся на совокупности взаимосвязанного и взаимодействующего между собой механизма функционирования [Горяченко и др., 2011].

Согласно Распоряжению Правительства РФ от 13.02.2019 № 207-р (ред. от 30.09.2022) «Об утверждении Стратегии пространственного развития РФ на период до 2025 г.» в качестве перспективных центров экономического роста страны обозначено 40 агломераций, исходя из намеченного стратегического планирования и правового регулирования каждого из центров роста экономики. Стратегия предусматривает их статусное деление на девять категорий: агропромышленный центр, геостратегическая территория РФ, крупная городская агломерация, крупнейшая городская агломерация, минерально-сырьевой центр, перспективная экономическая специализация субъекта РФ, перспективный центр экономического роста, территория пространственного развития и сельская территория.

По данной классификации Иркутская агломерация входит в перечень перспективных крупных центров, специализирующаяся на добыче нефти и золота, следовательно, относится к категории «минерально-сырьевого центра» в составе Ангаро-Енисейского макрорегиона, куда относятся также соседний Красноярский край (добыча нефти и природного газа) и Республики Тыва и Хакасия.

Под влиянием объективных социально-экономических факторов Иркутская агломерация сложилась как моноцентрическая городская агломерация, в состав которой вошли города – Иркутск (ядро агломерации), Ангарск и Шелехов, а также 19 населенных пунктов из состава Ангарского городского округа, Иркутского и Шелеховского муниципальных районов (рис. 1а). Отметим, что границы агломерационного ареала не обязаны совпадать с административными границами, например муниципального района, они

вмещают территории исходя из единого функционирования пространства [Горяченко и др., 2011]. Основная часть населения сконцентрирована в трех городах – Иркутске (623.6 тыс. чел.), Ангарске (222 тыс. чел.) и Шелехове (48.4 тыс. чел.), расположенных на юге Иркутской области, вдоль Транссибирской магистрали. Общая численность жителей агломерации на 2023 г. составляет 991.2 тыс. чел., или около 40% населения Иркутской области. В целом для области характерно крайне неравномерное размещение населения – самая высокая плотность в г. Иркутске – 2 227 чел/км<sup>2</sup>, а средняя плотность по поселениям Иркутского района – 9 чел/км<sup>2</sup>. Отсюда доля городского населения агломерации 78.9%, т. е. это высоко урбанизированная территория.

В то же время Байкальская рифтовая зона (БРЗ), на которой расположена Иркутская агломерация, относится к наиболее сейсмоактивным территориям РФ (7–9 баллов). Высокий сейсмический потенциал БРЗ подтверждается многочисленными данными, полученными при макросейсмических обследованиях, результатах исследований палеосейсмодислокаций, по записями сейсмостанций широкого энергетического диапазона. Только за период с сентября по январь 2020–2021 гг. в регионе произошли три сильных землетрясения: Быстринское с  $M_w = 5.5$  (21.09.2020); Кударинское с  $M_w = 5.5$  (09.12.2020) и Хубсугульское с  $M_w = 6.7$  (11.01.2021) [Радзиминович и др., 2021; Гилёва и др., 2020]. Кроме того, на юге Иркутской области сконцентрирован значительный промышленный потенциал – алюминиевые заводы, химические и нефтеперерабатывающие предприятия, крупные транспортно-логистические узлы, характер производства которых отличается чрезвычайно высокой степенью экологической опасности.

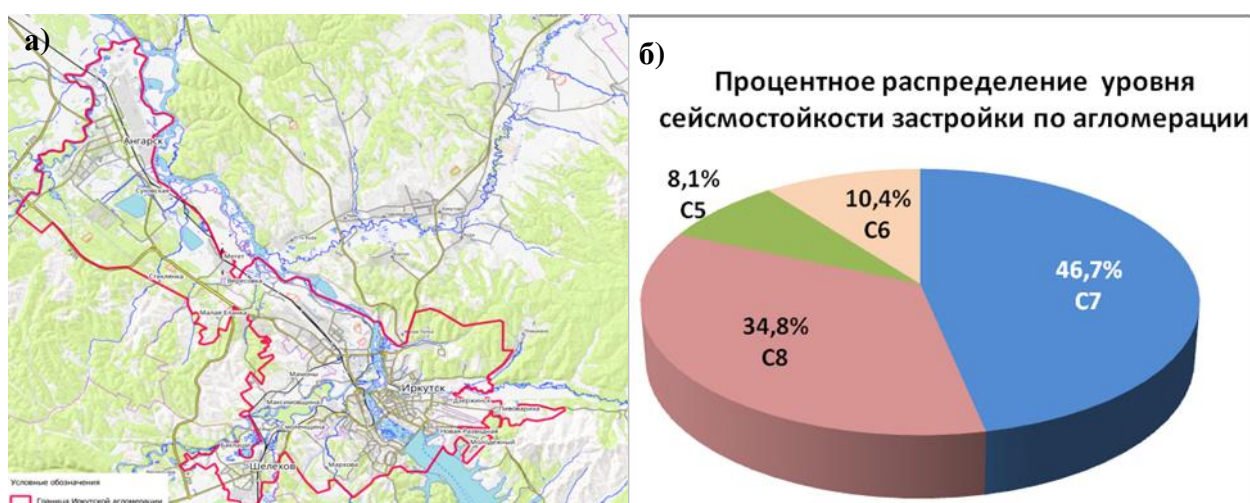


Рис. 1. Иркутская агломерация: а) план-схема границ Иркутской агломерации; б) распределение жилищного фонда агломерации по уровню сейсмостойкости

Жилищный и производственный фонд агломерации, значительная доля которого за период эксплуатации подвергалась многократному воздействию землетрясений различной интенсивности, оценивается почти в 27 млн. кв. м общей площади. В силу различных причин структура застройки неоднородна, разная степень сейсмостойкости и физического износа предопределяет ее разную надежность и безопасность вследствие землетрясения (рис. 1б). Доля нового строительства, возведенного за последние 20 лет, составляет 20.2% от общей площади жилой застройки по агломерации.

Оценки дефицита сейсмостойкости основаны на результатах паспортизации и макросейсмического обследования последствий землетрясений в Прибайкалье [Бержинская, Бержинский, 2009; Бержинская и др., 2022]. Количество общей площади застройки и численность жителей по населённым пунктам определена с помощью данных Росстата (<https://rosstat.gov.ru>).

Для определения прогнозной количественной оценки сейсмической опасности на исследуемой территории, необходимой при расчете сейсмического риска, использовались карты ОСР-2015 и табличные данные СП 14.13330.2018, которые показывают максимальную интенсивность возможных сотрясений грунта за установленный промежуток времени и среднюю повторяемость землетрясений в регионе. Для расчетов риска была принята исходная сейсмическая опасность 8 баллов.

Основой концепции модели сейсмического риска Сейсмологического центра ИГЭ РАН служит: прямой ущерб формируется из ряда экономических ущербов и экономического эквивалента социального ущерба, выраженного в относительной форме [Методика..., 2000]. Следовательно, главными показателями сейсмического риска станут оценки социальных и экономических значений в различных населённых пунктах агломерации [Фролова и др., 2022].

Сопоставляя полученные значения индивидуального сейсмического риска между тремя основными городами агломерации, отметим, что в наилучшем положении оказался г. Шелехов, у которого процент сейсмостойких зданий значительно выше, чем у других городов, отсюда результирующая величина сейсмического риска в 3 и 2.6 раза ниже, чем у городов Иркутска и Ангарска. Тем не менее само значение индивидуального сейсмического риска во всех городах превышает уровень «приемлемого риска», принятого равным  $1 \times 10^{-5}$  (1/год). Максимальная величина индивидуального риска в остальных населенных пунктах агломерации в десятки раз превышает уровень «приемлемого риска». В целом уровень сейсмического риска на территориях агломерации характеризуется величинами от «умеренного» до «весьма высокого». Таким образом, в целях повышения взаимного развития

и сейсmobезопасности территорий агломерации необходимо планомерное проведение комплекса превентивных мероприятий на каждой из урбанизированных территорий.

### *Литература*

- Бержинская Л.П., Бержинский Ю.А.* Методы паспортизации зданий в сейсмических районах // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 2. С. 57–69.
- Бержинская Л.П., Радзиминович Я.Б., Саландаева О.И., Новопашина А.В., Лухнева О.Ф., Иванова Н.В.* Комплексная оценка сейсмической опасности и уязвимости объектов как перспектива дальнейшего градостроительного развития территорий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2022. Т. 49. № 1. С. 18–33. DOI:[10.21455/VIS2022.1-2](https://doi.org/10.21455/VIS2022.1-2)
- Гилёва Н.А., Кобелева Е.А., Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Чечельницкий В.В.* Быстринское землетрясение 21.09.2020 г. ( $M_w = 5.5$ ) в Южном Прибайкалье: предварительные результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 4. С. 55–71.
- Горяченко Е.Е., Мосиенко Н.Л., Демчук Н.В.* Городские агломерации Сибири: предпосылки формирования и барьеры развития // Регион: экономика и социология. 2011. № 3. С. 94–112.
- Методика прогнозирования последствий землетрясений. М.: ВНИИ ГОЧС – ЦИЭКС – Сейсмологический центр ИГЭ РАН, 2000. 27 с.
- Перцик Е.Н.* Геоурбанистика. М.: Academia, 2009. 481 с.
- Радзиминович Я.Б., Гилёва Н.А., Тубанов Ц.А., Лухнева О.Ф., Новопашина А.В., Цыдытова Л.Р.* Макросейсмические проявления Кударинского землетрясения 9 декабря 2020 г. ( $M_w = 5.5$ ) на Среднем Байкале // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: Тезисы докладов Всероссийского совещания. Иркутск: ИГУ, 2021. С. 209–210.
- Фролова Н.И., Малаева Н.С., Ружич В.В., Бержинская Л.П., Левина Е.А., Суцев С.П., Ларионов В.И., Угаров А.Н.* Оценка социальных и экономических показателей сейсмического риска на примере г. Ангарск // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 2. С. 86–113. DOI:[10.21455/gpb2022.2-5](https://doi.org/10.21455/gpb2022.2-5)

## **PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE IRKUTSK AGGLOMERATION FROM THE STANDPOINT OF SEISMIC RISK**

**Berzhinskaya L.P.**<sup>1,2</sup>, Ivanova N.V.<sup>1,2</sup>, Levina E.A.<sup>1</sup>, Ruzhich V.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of the Earth's Crust SB, RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup> *Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Irkutsk, Russia*

*E-mail: [Berj.LP@yandex.ru](mailto:Berj.LP@yandex.ru)*

УДК: 550.348.436

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ОТ ИСПОЛЬЗУЕМОГО НАБОРА ЗАПИСЕЙ

Бурлаков И.С.<sup>1,2</sup>, Фомочкина А.С.<sup>1,2</sup>, Филиппова А.И.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия*

<sup>3</sup> *Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
имени Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

E-mail: [burilyakov@yandex.ru](mailto:burilyakov@yandex.ru)

(устный доклад)

**Аннотация:** Проведен анализ зависимости параметров пространственно-временной модели очага землетрясения от используемого набора записей поверхностных волн. Для этого программно реализован статистический метод «складного ножа». Приведены расчеты для четырех землетрясений: Тофаларского  $M_w = 5.4$  (06.09.2021), Улахан-Чистайского  $M_w = 5.6$  (20.01.2013) и двух сильнейших землетрясений в Турции  $M_w = 7.8$  и  $M_w = 7.7$  (06.02.2023). Показано, что наибольшее влияние на значения очаговых параметров оказывают записи сейсмических станций, расположенных в направлениях близких к простиранию истинной плоскости разрыва и перпендикулярных ему, а также записи станций, являющихся единственными в большом азимутальном окне.

**Ключевые слова:** пространственно-временная модель очага землетрясения, поверхностные волны, метод «складного ножа»

Данное исследование сосредоточено на оценке зависимости параметров пространственно-временной модели очага землетрясения от используемого набора записей поверхностных волн Лява и Рэля, зарегистрированных на сейсмических станциях. Для оценки параметров очага используются только записи с хорошим соотношением сигнал/шум на станциях, равномерно распределенных по азимуту относительно эпицентра. Результаты анализа напрямую зависят от выбора конкретных записей на отдельных станциях. Иногда возникает ситуация, когда записи сильно зашумлены предшествующими или последующими событиями. Поэтому возникает вопрос о влиянии набора данных на качество получаемого решения. Для изучения этой зависимости в данной работе предлагается использовать статистический метод, известный как метод «складного ножа» [Фомочкина, Букчин, 2020]. Анализ выполнен на примере четырех сейсмических событий разного энергетического уровня: Улахан-Чистайского землетрясения в Якутии (20.01.2013,  $M_w = 5.6$ ), землетрясения в Тофаларии (06.09.2021,  $M_w = 5.4$ ) и двух сильнейших землетрясений в Турции (06.02.2023,  $M_w = 7.8$  и  $M_w = 7.7$ ).

Предварительно для каждого землетрясения были проведены расчеты в приближении мгновенного точечного источника и получены пять параметров, описывающих его: глубина ( $h$ ), фокальный механизм, определяемый углами простирания (strike), падения (dip)

и подвижки (slip), и сейсмический момент ( $M_0$ ) [Букчин, 1989]. В табл. 1 представлены значения указанных параметров для рассматриваемых землетрясений.

Таблица 1. Параметры очагов землетрясений в приближении мгновенного точечного источника

Землетрясение	$h$ , км	$M_0$ , Н·м	$M_w$	Нодальная плоскость		
				strike, °	dip, °	slip, °
Тофаларское	45	$1.3 \times 10^{17}$	5.4	120	55	65
				339	41	121
Улахан-Чистайское	18	$2.7 \times 10^{17}$	5.6	25	70	140
				131	53	25
Турецкое $M_w = 7.8$	12	$6.19 \times 10^{20}$	7.8	330	85	150
				63	60	6
Турецкое $M_w = 7.7$	6–14	$4.29 \times 10^{20}$	7.7	5	85	-135
				270	45	-7

Затем, переходя к рассмотрению очага в предположении плоского источника, были получены оценки шести интегральных параметров: продолжительности действия источника ( $\Delta t$ ), максимального ( $l_{\max}$ ) и минимального ( $l_{\min}$ ) среднего размера очага (длина большой и малой оси), угла между направлением большой оси и направлением простирания ( $\phi_l$ ), абсолютного значения средней скорости мгновенного пространственного центроида ( $v$ ), угла между направлением скорости и направлением простирания ( $\phi_v$ ) [Букчин, 2017]. Для всех землетрясений, кроме Улахан-Чистайского, удалось выделить истинную плоскость разрыва [Букчин, 2017]. В табл. 2 приведены расчеты упомянутых интегральных характеристик для изучаемых событий и минимальное значение невязки ( $\epsilon$ ) между наблюдаемыми и теоретическими спектрами поверхностных волн. Для Улахан-Чистайского землетрясения разрешение для значений углов и абсолютного значения средней скорости оказалось очень низким, и получить надежные оценки не удалось.

Таблица 2. Параметры очагов землетрясений в приближении плоского источника

Землетрясение	Плоскость	$\Delta t$	$l_{\max}$	$l_{\min}$	$\phi_l$	$\phi_v$	$v$	$\epsilon$
Тофаларское	120°, 55°, 65°	6	30	5	135	135	4.5	0.264
Улахан-Чистайское	25°, 70°, 140°	0	10	0.0	-	-	-	0.296
	131°, 53°, 25°	0	18	0.0	-	-	-	0.295
Турецкое $M_w = 7.8$	63°, 60°, 6°	21	60	25	115	340	1.5	0.330
Турецкое $M_w = 7.7$	270°, 45°, -7°	12	55–60	10.0	150	150	4.2–4.5	0.293

Для исследования зависимости параметров от используемых данных применялся статистический метод «складного ножа». Он позволяет обобщить информацию, полученную из выборки, с целью получить представление о свойствах генеральной совокупности. Метод был разработан Морисом Кенуи в 1949 г. и доработан Джоном Тьюки в 1958 г. [Tichelaar, Ruff, 1989].

По полученным результатам исследования для каждого из рассмотренных событий были сделаны выводы: выявлены наиболее важные для решения записи. Для землетрясения в Тофаларии такой оказалась одна станция, оказавшаяся единственной в большом азимутальном диапазоне с хорошим соотношением сигнал/шум.

Для Улахан-Чистайского события наиболее важными оказались станции, расположенные вблизи направлений простирания истинной плоскости разлома и перпендикулярного ему. В данных направлениях для источников с преобладанием сдвиговой компоненты наиболее выражено отличие излучений в приближениях мгновенного точечного источника и плоской подвижки.

Для землетрясения в Турции с  $M_w = 7.8$  значимыми получились записи станций, расположенных близко к направлению угла простирания плоскости разрыва. Для землетрясения с  $M_w = 7.7$  наиболее важными оказались записи на станциях, находящихся рядом с направлением, перпендикулярным углу простирания плоскости разрыва. Это также связано с наибольшим различием в излучениях.

Полученные результаты важны для определения надежности исследуемых пространственно-временных характеристик, а также служат материалом для дальнейшего анализа зависимости параметров моделей очага от используемого набора записей.

*Работа частично выполнена в рамках государственного задания ИТПЗ РАН (№ 0143-2019-0007) и частично при финансовой поддержке РФФ (грант № 21-77-10070).*

### **Литература**

- Букчин Б.Г. Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // Известия АН СССР. Серия Физика Земли. 1989. № 9. С. 34–41.
- Букчин Б.Г. Описание очага землетрясения в приближении вторых моментов и идентификация плоскости разлома // Физика Земли. 2017. № 2. С. 76–83. DOI:[10.7868/S0002333717020041](https://doi.org/10.7868/S0002333717020041)
- Фомочкина А.С., Букчин Б.Г. Зависимость погрешности определения параметров землетрясения от набора записей поверхностных волн // Физика Земли. 2020. № 1. С. 109–117. DOI:[10.31857/S0002333720010019](https://doi.org/10.31857/S0002333720010019)
- Tichelaar B.W., Ruff L.J. How Good Are Our Best Models? Jackknifing, Bootstrapping, and Earthquake Depth // Eos. 1989. V. 70. No 20. P. 593–606. DOI:[10.1029/89EO00156](https://doi.org/10.1029/89EO00156)

## **ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF THE SPACE-TIME MODEL OF THE EARTHQUAKE SOURCE ON THE USED SET OF RECORDS**

**Burlakov I.S.<sup>1,2</sup>, Fomochkina A.S.<sup>1,2</sup>, Filippova A.I.<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, RAS, Moscow, Troitsk, Russia*

E-mail: [burilyakov@yandex.ru](mailto:burilyakov@yandex.ru)



УДК 550.3 + 551.24

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ МЕТОДАМИ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ

Владимирова И.С.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия*

*E-mail: [ir.s.vladimirova@yandex.ru](mailto:ir.s.vladimirova@yandex.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** Работа посвящена моделированию и изучению геодинамических процессов, протекающих в окрестностях очаговых зон сильнейших ( $M \geq 8$ ) субдукционных землетрясений на разных стадиях сейсмического цикла на основе данных спутниковой геодезии. Исследованы процессы подготовки и реализации ряда сильнейших событий, произошедших в Курило-Камчатской, Чилийской, Японской и Алеутской зонах субдукции в начале XXI в. Выявлены явные пространственные взаимосвязи между геодинамическими процессами, протекающими на разных стадиях сейсмического цикла. Показано, что структурные неоднородности геосреды оказывают непосредственное влияние на процессы накопления и высвобождения упругих напряжений.

**Ключевые слова:** сейсмический цикл, зоны субдукции, сильнейшие землетрясения, сеймотектонические деформации, очаговая зона, численное моделирование

Субдукционные зоны характеризуются крайне высоким уровнем сейсмической и тектонической активности. Именно эти зоны ответственны за возникновение сильнейших за всю историю сейсмологических наблюдений землетрясений, унесших тысячи человеческих жизней и нанесших наибольший экономический и экологический урон. Так, например, в период с 1900 по 2014 г. практически все сильнейшие землетрясения с  $M \geq 8$  были приурочены к субдукционным регионам [Lay, 2015]. Таким образом, понимание закономерностей процессов подготовки и реализации подобных событий в зонах субдукции крайне важно для корректной оценки сейсмической опасности и совершенствования методов прогнозирования будущих сильнейших землетрясений.

Большой шаг в этом направлении был сделан с развитием спутниковых геодезических методов с 70-х годов XX в. благодаря открывшейся возможности прямого и непрерывного наблюдения деформаций земной поверхности, сопровождающих сейсмические события. Результаты таких наблюдений, проводившихся в сейсмоактивных регионах по всему земному шару, позволили усовершенствовать наши представления о деформировании земной поверхности в ходе сейсмического цикла (рис. 1). В частности, на основе анализа спутниковых геодезических данных были выделены короткая предсейсмическая и достаточно длительная постсейсмическая стадии цикла, а позднее – выявлен не полностью стационарный характер течения межсейсмической стадии накопления напряжений.

Определение длительности сейсмического цикла является важным этапом решения задачи прогнозирования землетрясений [Садовский, 2004]. Для получения корректных оценок продолжительности сейсмического цикла, в свою очередь, необходимо изучение

геодинамических процессов, протекающих на всех стадиях сейсмического цикла, а также выявление возможных взаимосвязей между этими процессами. Кроме того, важно понять, оказывают ли региональные геолого-тектонические особенности влияние на течение сейсмических циклов в конкретном регионе.

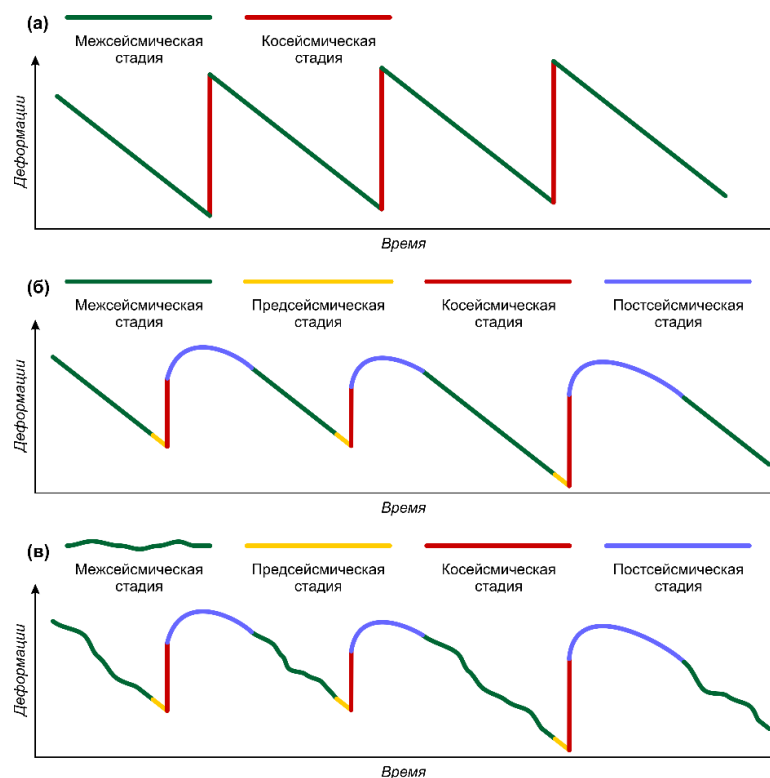


Рис. 1. Эволюция представлений о деформировании геосреды в ходе сейсмического цикла: (а) – согласно теории упругой отдачи [Reid, 1910]; (б) – представление 1990–2010-х гг., основанное на данных спутниковых геодезических наблюдений; (в) – современное представление

Наиболее явной сложностью в решении этих задач является малая длительность временного интервала накопленных измерений. Продолжительность сейсмических циклов для землетрясений с  $M \geq 8$ , как правило, исчисляется столетиями [Садовский, 2004], что объясняет отсутствие спутниковых геодезических (и даже сейсмологических) данных, полностью охватывающих хотя бы один сейсмический цикл между двумя сильнейшими событиями. Попытки преодоления этой сложности приводят к необходимости совместного анализа данных сразу из нескольких зон субдукции, находящихся на разных стадиях сейсмического цикла. Такое объединение необходимо для построения обобщенной схемы сейсмического цикла, учитывающей как краткосрочные, так и длительные геодинамические процессы, управляемые различными механизмами. С этой целью в данной работе исследованы геодинамические процессы, предваряющие и сопровождающие ряд сильнейших землетрясений, произошедших в Курило-Камчатской, Чилийской, Японской и Алеутской зонах субдукции в начале XXI века.

Автором проведен комплексный анализ обширного набора спутниковых геодезических, сейсмологических и геологических данных, в результате чего для каждого из событий было построено семейство моделей, описывающих состояние очаговой зоны до, во время и после землетрясения. Полученные модели являются результатом решения обратных задач, сводящихся к минимизации невязок между измеренными спутниковыми методами и смоделированными предсейсмическими скоростями, а также косейсмическими и постсейсмическими смещениями. Используемый подход к решению обратных задач подробно описан в [Steblov, Vladimirova, 2023].

На основе построенных моделей проведено исследование пространственных отношений степени межплитового сцепления перед землетрясениями, а также сейсмических и постсейсмических смещений в их очаговых зонах. Установлен факт общей согласованности конфигураций областей значимых сейсмических смещений в очаге с зонами максимального межплитового сцепления. Области максимального постсейсмического крипа зачастую соседствуют с областями наибольших сейсмических смещений в очаге, что указывает на постсейсмическую релаксацию напряжений в тех участках очаговой зоны, где они остались высокими после землетрясения. Пример такого анализа для землетрясения Тохоку 2011 г. с  $M_w = 9.0$  (Японская зона субдукции) приведен на рис. 2.

Исследовано влияние структурных неоднородностей геосреды различного иерархического уровня, принадлежащих как субдуцирующей, так и надвигающейся плите, на процессы накопления и высвобождения напряжений. Показано, что геологические структуры различного генеза, будь то разломная зона или асейсмический подводный хребет, затягивающийся в зону субдукции вместе с океанической плитой, зачастую выступают в роли естественных границ, в пределах которых локализуется область сейсмических смещений в очаге. Замечено, однако, что те же самые геологические границы, как правило, не являются препятствием для распространения медленных постсейсмических деформаций. Что касается предсейсмического межплитового сцепления – присутствие структурных неоднородностей в зоне субдукции выражается в локальном, но достаточно заметном снижении или повышении коэффициента сцепления. Пример влияния основных разломных структур на распределения межплитовой сцепленности, сейсмических и постсейсмических смещений в очаговой зоне землетрясения Тохоку 2011 г. с  $M_w = 9.0$  (Японская зона субдукции) приведен на рис. 2.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии явной пространственной взаимосвязи между геодинамическими процессами, протекающими на разных стадиях сейсмического цикла. Установлено также, что к руководящим факторам, определяющим особенности протекания сейсмического цикла в той или иной зоне субдукции, относятся не

только тип субдукционной зоны, скорость конвергенции плит, региональные реологические параметры, но и геоморфологические условия, характерные для данного региона.

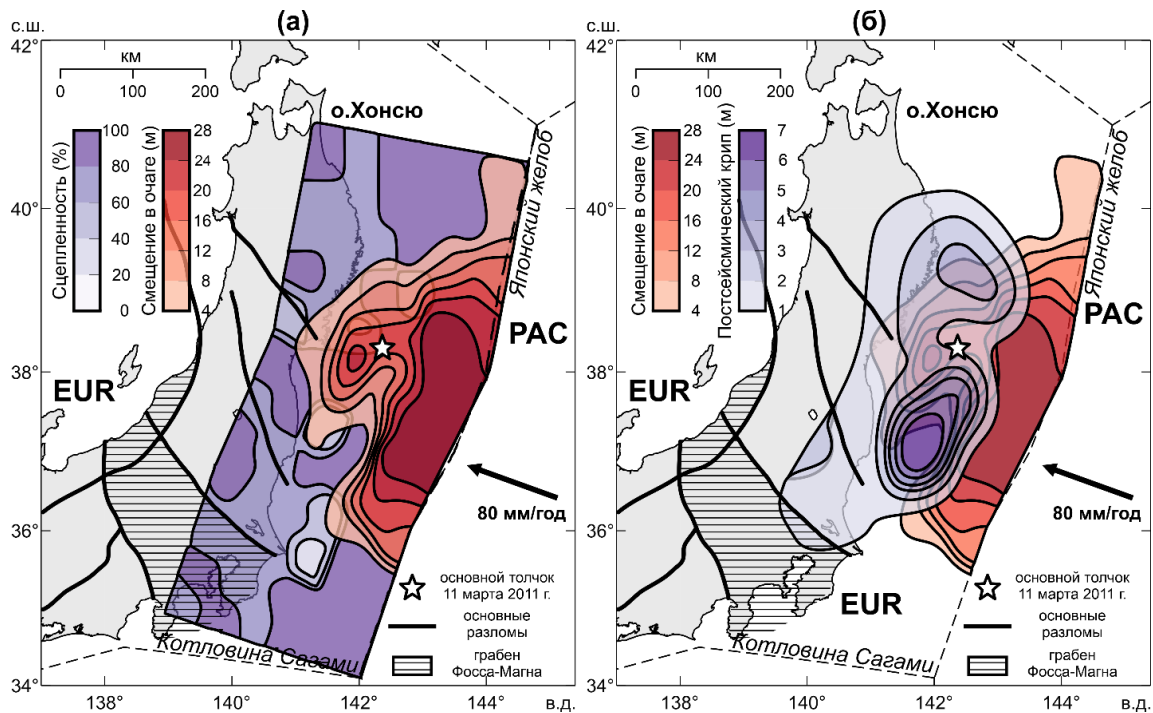


Рис. 2. Пространственные отношения степени механического сцепления межплитового контакта перед землетрясением Тохоку 2011 г. и распределенной сейсмической подвижки в плоскости его очага (а), а также распределенных сейсмической подвижки и полугодового постсейсмического крипа (б). PAC – Тихоокеанская литосферная плита, EUR – Евразийская

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FMWE-2021-0004.

### Литература

- Садовский М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 2004. 440 с.
- Lay T. The surge of great earthquakes from 2004 to 2014 // Earth and Planetary Science Letters. 2015. V. 409. P. 133–146. DOI:[10.1016/j.epsl.2014.10.047](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.10.047)
- Reid H. The Mechanism of the Earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906. Report of the State Investigation Commission. Carnegie Institution of Washington: Washington DC, 1910. 206 p.
- Steblov G., Vladimirova I. Geodetic Inversions and Applications in Geodynamics. In A. Ismail-Zadeh, F. Castelli, D. Jones, and S. Sanchez (Eds.), Applications of Data Assimilation and Inverse Problems in the Earth. Cambridge: Cambridge University Press, 2023. P. 278–292. DOI:[10.1017/9781009180412.019](https://doi.org/10.1017/9781009180412.019)

## STUDY OF SEISMIC CYCLES OF THE STRONGEST EARTHQUAKES IN SUBDUCTION ZONES USING SATELLITE GEODESY METHODS

Vladimirova I.S.

Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

E-mail: [ir.s.vladimirova@yandex.ru](mailto:ir.s.vladimirova@yandex.ru)

УДК 550.34

## ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА ПЕРЕВОДА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КЛАССОВ В МАГНИТУДЫ НА ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Герман В.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Красноярский научно-исследовательский институт  
геологии и минерального сырья, г. Красноярск, Россия

E-mail: [german3v@yandex.ru](mailto:german3v@yandex.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** Показано, что умеренные, но системные ошибки при оценке магнитуд в каталогах землетрясений способны существенно исказить оценки сейсмической опасности, построенные на их основе. Указанные ошибки в значениях магнитуд часто связаны с использованием некорректных методов их расчета по значениям энергетического класса. Описаны основные особенности разработанной трехэтапной процедуры, которая позволяет минимизировать такого рода ошибки. Приведен пример ее применения для Байкальского региона.

**Ключевые слова:** системные ошибки при оценке магнитуд, сейсмическая опасность, обобщенная ортогональная регрессия

Важным этапом в оценке сейсмической опасности является составление сводного каталога землетрясений с унифицированной оценкой их магнитуды (как правило, магнитуды  $M_S$  или  $M_w$ ). Он используется для оценок сейсмического режима на исследуемой территории. В ряде случаев он также может использоваться и для оценки максимальной возможной магнитуды, максимальной магнитуды за фиксированный интервал времени или максимальной ожидаемой магнитуды [Писаренко, Родкин, 2009; Некрасова и др., 2020; и др.]. На территории России, как правило, магнитуды для слабых и большей части землетрясений не определяются. Их сила оценивается в энергетических классах [Раутиан, 1960], по которым требуется оценить значения магнитуд. К сожалению, далеко не всегда это делается корректно.

Поскольку сейсмический режим и максимальные магнитуды являются определяющими параметрами для оценок сейсмической опасности  $I$ , то погрешности определения магнитуд в каталоге могут существенно изменить и оценки  $I$ . Особое значение при этом имеют системные ошибки в оценках магнитуды  $\Delta M$ . Далее для удобства введем следующие обозначения:  $M$  – корректные оценки магнитуд,  $M_\Delta = M + \Delta M$  – оценки с системной погрешностью  $\Delta M$ , или «смещенные» оценки.

Системные ошибки в оценках магнитуды в каталогах для территории России часто возникают, когда оценка  $M$  производится по значениям энергетического класса  $K$  или другим видам магнитуд  $m$ . Это происходит в случае, если используются не региональные соотношения  $M(K)$  или  $M(m)$ , а некоторые общие зависимости, слабо подходящие для рассматриваемого региона. Одной из них является зависимость, предложенная Т.Г. Раутиан:  $M = (K - 4.0)/1.8$  [Раутиан, 1960], которую до сих пор рекомендуется использовать для

большинства регионов России [Габсатарова, Пойгина, 2023]. В частности, ее применяли в работах по составлению карт общего сейсмического районирования ОСР-97 [Kondorskaya, Ulomov, 1999]. В работе [Петрова, Михайлова, 2014] на основе построения региональных соотношений  $M_S(K)$  с использованием стандартной ортогональной регрессии было показано, что для всех рассмотренных регионов формула Т.Г. Раутиан дает завышенные оценки магнитуды. Максимальные завышения  $\Delta M$  отмечаются для Байкальского и Алтае-Саянского регионов. Значения  $\Delta M$  для них изменяются от 0.23 до 0.75 ед. магнитуды. Близкие результаты были получены в работе [Герман, 2021] для 600-км зоны вокруг Красноярска. В этом случае  $\Delta M = 0.23$ . Для северо-запада Якутии автором было установлено, что  $\Delta M = 0.21$ .

Оценить влияние ошибок оценок магнитуд  $\Delta M$  можно с помощью закона Гутенберга – Рихтера, который в случае использования «смещенных» оценок  $M_\Delta$  будет иметь вид:  $\lg(N) = a - b M_\Delta$ , где коэффициент  $b$ , как правило, близок к 1. Согласно этому выражению системное завышение в каталоге магнитуды  $M$ , например на  $\Delta M = 0.3$ , приведет к завышению числа землетрясений  $N$  с магнитудой  $M$  в  $10^{b \Delta M} = 10^{0.3} \approx 2$  раза. В это же число раз увеличится повторяемость сотрясений с интенсивностью  $I$ , а период повторяемости сотрясений уменьшится в 2 раза. В случае карт общего или детального сейсмического районирования это может означать, что карты, рассчитанные для периода в 500 лет (карта А), используемые для объектов массового строительства, будут в реальности соответствовать периоду в 1000 лет (карта В), применяемому для объектов повышенной ответственности.

Очевидно, что системные ошибки в оценках магнитуды способны привести к существенному искажению оценок максимальной возможной магнитуды, максимальной магнитуды за фиксированный интервал времени, а также оценок максимальной ожидаемой магнитуды и соответственно получаемых с их использованием оценок сейсмической опасности. Эффект от таких ошибок можно оценить на основе уравнения Шебалина – Блейка со средними значениями коэффициентов, указанных в ГОСТ 57546-2017 «Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности», связывающего сейсмическую интенсивность  $I$  с магнитудой  $M_S$  и гипоцентральной расстоянием  $R$ :  $I = 1.5 M_S - 3.5 \lg R + 3.0$ . Соответственно, в вышеприведенном случае с системной ошибкой  $\Delta M = 0.3$  интенсивность  $I$  увеличится более чем на 0.4 балла. Такое изменение сопоставимо с влиянием грунтовых условий на площадках строительства (устанавливается в результате проведения сейсмического микрорайонирования). Оно может потребовать существенного изменения проектных решений.

Некорректное определение угла наклона при использовании линейных соотношений  $M(K)$  способно также исказить значения угла наклона графика повторяемости и таким образом изменить оценки сейсмической опасности.

Приведенные примеры влияния системных ошибок  $\Delta M$  при оценке магнитуды в сводных унифицированных каталогах показывают важность минимизации  $\Delta M$ . Поскольку

для большей части России магнитуды слабых и умеренных землетрясений не определялись, а рассчитывались энергетические классы  $K$ , то центральным вопросом становится получение максимально корректных региональных соотношений между магнитудами  $M_S$ ,  $M_w$  и энергетическими классами  $K$ .

В связи с тем, что обе рассматриваемые величины  $K$  и  $M$  определяются со значимыми погрешностями, то для оценки коэффициентов  $\beta$  и  $\alpha$  в соотношении  $M = \beta K + \alpha$  необходимо использовать специальные методы (конфлюэнтный анализ) [Кендалл, Стюарт, 1973]. Применение метода наименьших квадратов в данном случае будет не корректным. Из-за разностей в уровнях среднего квадратического отклонения ошибок определения величин  $K$  и  $M$  (отклонения для  $K$ , как правило, превышают отклонения для  $M$  более чем в 3 раза) применение стандартной ортогональной регрессии также будет не корректно и может приводить к существенным искажениям [Castellaro, Bormann, 2007]. Дополнительно следует учитывать, что в области малых значений  $K$  и  $M$  (ниже пороговых величин  $K_{lr}$  и  $M_{lr}$ ) данные являются неполными, или, иначе, непредставительными, имеющими пропуски в силу ограниченной чувствительности регистрации сейсмической сети. Кроме того, отдельные значения  $K_i$  и/или  $M_i$  могут содержать большие ошибки и значительно исказить оценки коэффициентов  $\beta$  и  $\alpha$ .

Для минимизации ошибок  $\Delta M$  была разработана трехэтапная процедура нахождения коэффициентов  $\beta$  и  $\alpha$  зависимостей  $M(K)$ , учитывающая описанные особенности величин  $K$  и  $M$ . На первых двух этапах проводилась предобработка данных с исключением непредставительных данных в области малых магнитуд и аномальных пар  $(M_i, K_i)$ . Сначала  $\beta$  и  $\alpha$  оценивались с использованием процедуры, основанной на построении «порядкового приближения» [Кукинов, 1985], устойчивой к «выбросам» и ошибкам определения  $M$  и  $K$ , а также неполноте данных. Затем, на основе полученных значений, отбрасывались аномальные пары  $(M_i, K_i)$ , соответствующие непредставительным данным, либо аномально большим «отскокам» от прямой аппроксимирующей зависимость  $M(K)$ . На третьем этапе оценки коэффициентов  $\beta$  и  $\alpha$  находились по методу обобщенной ортогональной регрессии [Castellaro et al., 2006; Castellaro, Bormann, 2007] с использованием только отобранных данных. Для корректного применения этого метода предварительно оценивалось значение параметра  $\lambda$  – отношения средних квадратических отклонений ошибок определения  $M$  и  $K$  по данным сейсмологических бюллетеней с применением дисперсионного анализа (учитывалось число сейсмостанций, по показаниям которых рассчитывались магнитуды).

Применение предложенной трехэтапной процедуры для землетрясений Байкальского региона, зафиксированных в 2003–2021 гг., сведения о которых имеются в бюллетене Международного сейсмологического центра (ISC) [International..., 2023], показало, что использование зависимости Т.Г. Раутиан дает завышение магнитуд  $M_S$  в среднем на 0.6 ед. магнитуды. Стандартная ортогональная регрессия в области  $M_S = 5.0$ , наоборот, дает

занижение порядка 0.1 (рис. 1). Для других типов магнитуд также отмечается значимое расхождение оценок магнитуд, полученных по предложенной процедуре и при использовании стандартной ортогональной регрессии.

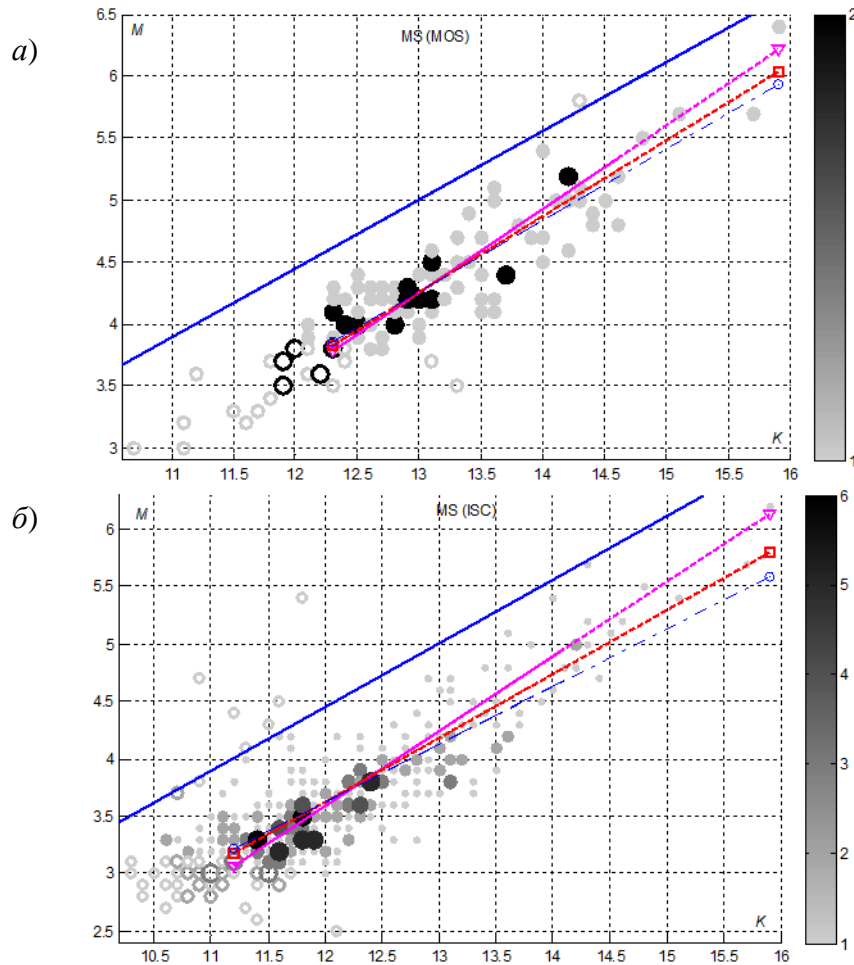


Рис. 1. Линейные аппроксимации зависимостей магнитуды  $M_s$ , определенной ФИЦ ЕГС РАН (а) и рассчитанной ISC (б), от энергетического класса. Линия с треугольниками на концах соответствует предложенной процедуре, основанной на обобщенной ортогональной регрессии, с квадратами – стандартной ортогональной регрессии, с окружностью – методу наименьших квадратов, верхняя линия соответствует зависимости Т.Г. Раутиан; серыми кружками и окружностями показаны пары  $(M_i, K_i)$ , их цвет и размер соответствуют числу таких пар; кружки – пары использованные в расчете по предложенной процедуре, окружности – исключенные

В результате проведенных исследований для исключения грубых искажений оценок сейсмической опасности предлагается использовать региональные зависимости между магнитудами  $M$  и энергетическим классом  $K$ . Для их установления необходимо использовать подходящие методы, учитывающие различия в исходной точности определения  $K$  и  $M$  (разбросы в станционных значениях  $K_j$  в разы больше разбросов  $M_j$ ). Стандартная ортогональная регрессия эти различия не учитывает и, как правило, приводит к занижению значений магнитуд. Указанные различия учтены в предложенной трехэтапной процедуре, основанной на методе обобщенной ортогональной регрессии. В ней также предварительно проводится исключение непредставительных данных и аномальных выбросов.



### Литература

- Габсатарова И.П., Пойгина С.Г. Унификация сейсмологических каталогов по магнитуде // Землетрясения России в 2021 году. Обнинск: ФИЦ ГС РАН, 2023. С. 138–141.
- Герман В.И. Связь магнитуд и энергетического класса для Алтае-Саянской складчатой области // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 26.
- Кендалл М., Стюарт А. Статистические выводы и связи. Т. 2. М.: Наука, Физматлит, 1973. 899 с.
- Кукинов А.М. Применение порядковых статистик и ранговых критериев для обработки наблюдений // Поиск зависимости и оценка погрешности. М.: Наука, 1985. С. 97–110.
- Некрасова А.К., Кособоков В.Г., Парвез И.А., Тао Х. Общий закон подобия для землетрясений в приложении к оценке сейсмической опасности и ассоциированных рисков // Физика Земли. 2020. № 1. С. 96–108. DOI:[10.1134/S0002333720010093](https://doi.org/10.1134/S0002333720010093)
- Петрова Н.В., Михайлова Р.С. Соотношения энергетического класса  $K_p$  с магнитудами по поверхностным волнам  $M_S$ ,  $M_s$ ,  $M_LH$  землетрясений в регионах Северной Евразии // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы Девятой Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск, 2014. С. 365–369.
- Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Неустойчивость параметра  $M_{max}$  и альтернатива его применению // Физика Земли. 2009. № 12. С. 48–59.
- Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности (Труды ИФЗ АН СССР № 9 (176)) / Отв. ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 75–113.
- Castellaro S., Bormann P. Performance of different regression procedures on the magnitude conversion problem // Bulletin of the Seismological Society of America. 2007. V. 97. P. 1167–1175. DOI:[10.1785/0120060102](https://doi.org/10.1785/0120060102)
- Castellaro S., Mulargia F., Kagan Y.Y. Regression problems for magnitudes // Geophysical Journal International. 2006. V. 165. No 3. P. 913–930. DOI:[10.1111/j.1365-246X.2006.02955.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02955.x)
- International Seismological Centre. On-line Bulletin. 2023. DOI:[10.31905/D808B830](https://doi.org/10.31905/D808B830)
- Kondorskaya N.V., Ulomov V.I. Special Catalogue of Earthquakes of the Northern Eurasia (SECNE). URL: <http://www.seismo.ethz.ch/static/gshap/neurasia/nordasiacat.txt>

### EFFECT OF THE CHOICE OF METHOD FOR CONVERTING ENERGY CLASSES TO MAGNITUDES ON SEISMIC HAZARD ASSESSMENTS

German V.I.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth Crust SB, RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Mineral Resources, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: [german3v@yandex.ru](mailto:german3v@yandex.ru)

УДК 550.34

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О СТРОЕНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ КОЛЬСКОГО РЕГИОНА МЕТОДОМ ФУНКЦИЙ ПРИЕМНИКА

Гоев А.Г.

*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН,  
г. Москва, Россия*

*E-mail: [andr.goev@gmail.com](mailto:andr.goev@gmail.com)*

(устный доклад)

**Аннотация.** В работе приводятся особенности глубинного скоростного строения основных тектонических элементов Кольского региона (Мурманского, Кольского и Беломорского мегаблоков), выявленные методом функций приёмника. Показано наличие в литосфере изучаемого региона средне литосферной неоднородности на глубинах 90–140 км. Также констатировано, что в современной скоростной структуре Хибно-Ловозерского тектонического узла присутствуют артефакты, вероятно, связанные с палеозойским плюмовым процессом.

**Ключевые слова:** сейсмология, Кольский полуостров, PRF, SRF, MLD, глубинное строение, плюм, рудопроявления

Строение литосферы и подстилающей части верхней мантии Кольского региона известно, преимущественно, на основе анализа данных всего двух глубинных профилей – профиля ГСЗ «Кварц» [Павленкова, Павленкова, 2008] и профиля 1-ЕВ [Золотов и др., 2000]. Метод функций приемника до недавнего времени был применен всего однажды [Dricker et al., 1996]. Особняком стоят работы, проведенные в Печенгском районе Кольского региона, где проходил уникальный эксперимент сверхглубокого бурения СГ-3 и отработано множество профилей МОВЗ, вскрывших подкоровую часть мантии [Кольская ..., 1998]. Однако и в этом районе сейсмологические исследования, по существу, остановились в 2000-х.

В 2021 году стартовал проект РНФ по изучению строения литосферы центральной и арктической частей Кольского полуострова и поисков возможных связей генезиса месторождений с различными геодинамическими, в частности плюм-литосферными, взаимодействиями. В рамках проекта совместно с Кольским филиалом ФИЦ ЕГС РАН были установлены четыре новые широкополосные станции – «Никель» (NIK), «Верхне-Тулумский» (VTUL), «Ковдор» (KVDR) и «Огни Мурманска» (OGM). Расположение сейсмических станций и их технические характеристики показаны на рис. 1 и в табл. 1 соответственно. Как видно, станции установлены в различных тектонических элементах, что позволит провести их сравнительный анализ. В представленной работе на основе анализа данных станций TER, LVZ, APA и KVDA по методике функций приемника [Винник, 2019]

проведен сравнительный анализ Мурманского, Кольского и Беломорского блоков, а также исследована структура Хибон-Ловозерского тектонического узла.

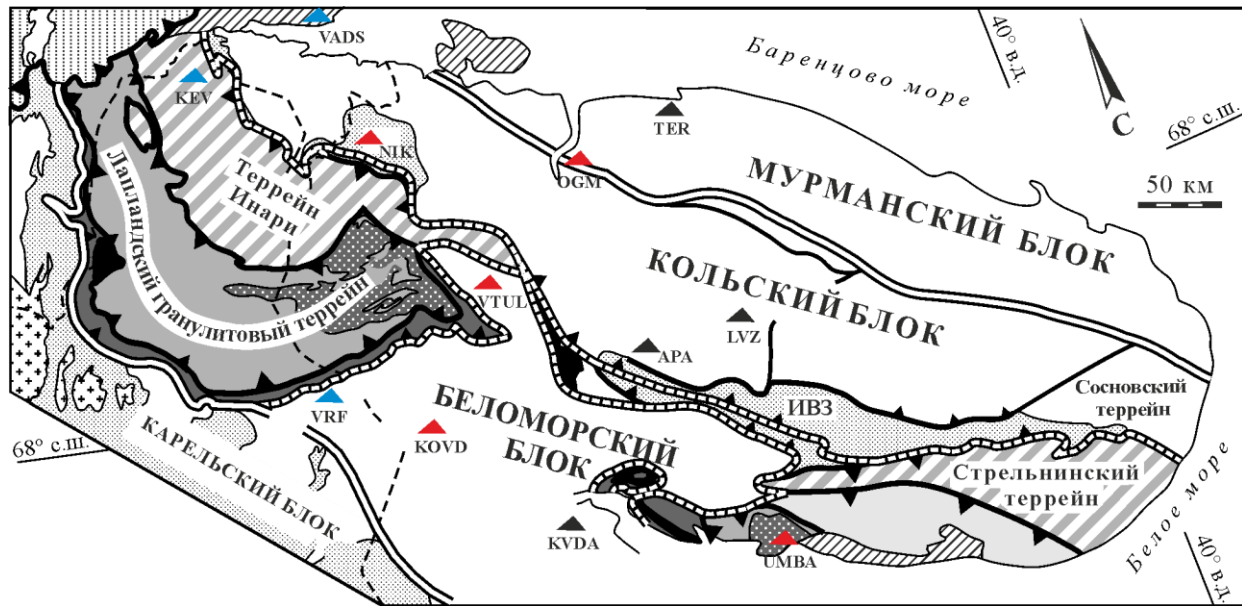


Рис. 1. Тектоническая схема Кольского региона по [Мудрук и др., 2013]. Черными треугольниками показано расположение широкополосных станций ФИЦ ЕГС РАН до 2021 года. Красными треугольниками показано расположение новых широкополосных сейсмических станций, синими треугольниками – постоянных широкополосных станций мировой сети

Таблица 1. Основные характеристики объединенной сейсмической сети Кольского региона

Название станции	Код станции	Широта	Долгота	Частотный диапазон (Гц)	Начало регистрации
Никель	NIK	69.24	30.13	0.03–50	06.2020
Верхне-Тулумский	VTUL	68.35	31.45	0.03–50	06.2021
Териберка	TER	69.20	35.10	0.03–50	12.2013
Ловозеро	LVZ	67.89	34.65	0.002–10	1991
Апатиты	APA	67.56	33.40	0.01–50	1991
Ковда	KVDA	66.69	32.87	0.03–100	07.2018
Умба	UMBA	66.67	34.34	0.03–100	05.2021
Ковдор	KVDR	67.56	30.47	0.008–100	12.2021
Огни Мурманска	OGM	68.93	33.14	0.03–100	10.2022

В результате исследования показано, что строение не только земной коры, но и верхней мантии Кольского региона существенно различается (рис. 2). Так, в верхней мантии Кольского и Беломорского мегаблоков выявлено наличие слоя пониженных скоростей, который не проявляется в скоростной модели Мурманского мегаблока, полученной на основе данных станции TER. Выявленная зона пониженных скоростей, ввиду

относительно малой глубины залегания 90–140 км, интерпретирована как средне литосферная неоднородность (MLD).

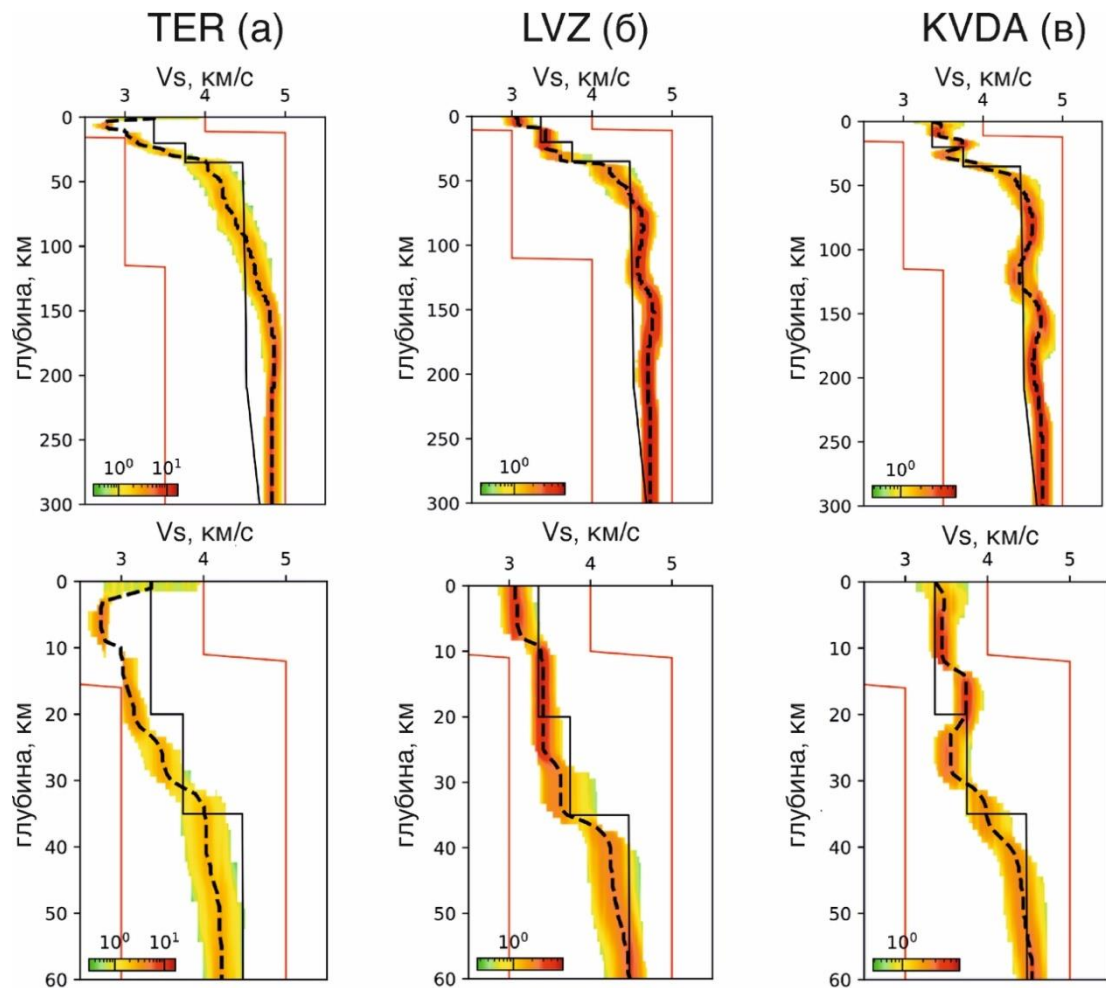


Рис. 2. Скоростные модели поперечных волн ( $V_s$ ) до глубин около 300 км (верхняя панель) и отдельно земной коры и верхней части верхней мантии до глубины 70 км (нижняя панель) для станций, расположенных в Мурманском блоке (TER (а)), Кольском блоке (LVZ (б)) и Беломорском блоке (KVDA (в)). Цветами показаны поля сгущения индивидуальных минимизированных случайных моделей. Пунктирными линиями показаны итоговые медианные модели. Красные линии обозначают границы формирования случайных начальных моделей. Черные линии представляют модель IASP91

Исследования Хибино-Ловозерского тектонического узла выявило существенную топографию коро-мантийного перехода с уменьшением мощности коры под исследуемыми щелочными интрузиями. Кроме того, в структуре верхней мантии под ними не выявлено MLD. Эти эффекты интерпретированы как следы палеозойского плюмового события, с которым связывается формирование Хибинского и Ловозерского массива.

*Работа выполнена за счет средств РНФ (грант № 21-17-00161) с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».*

### **Литература**

- Винник Л.П.* Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. С. 16–27. DOI:[10.31857/S0002-33372019116-27](https://doi.org/10.31857/S0002-33372019116-27)
- Золотов Е.Е., Костюченко С.Л., Ракитов В.А.* Неоднородности верхней мантии Балтийского щита по данным сейсмической томографии // Разведка и охрана недр. 2000. № 2. С. 27–29. DOI:[10.5800/GT-2022-13-1-0569](https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-1-0569)
- Кольская сверхглубокая: Научные результаты и опыт исследования / Отв. ред. В.П. Орлов, Н.П. Лаверов. М., 1998. 260 с.
- Мудрук С.В., Балаганский В.В., Горбунов И.А., Раевский А.Б.* Альпинотипная тектоника в палеопротерозойском Лапландско-Кольском орогене // Геотектоника. 2013. № 4. С. 13–30. DOI:[10.7868/S0016853X1304005X](https://doi.org/10.7868/S0016853X1304005X)
- Павленкова Г.А., Павленкова Н.И.* Результаты совместной обработки данных ядерных и химических взрывов по сверхдлинному профилю «Кварц» (Мурманск – Кызыл) // Физика Земли. 2008. № 4. С. 62–73.
- Dricker I.G., Roecker S.W., Kosarev G.L., Vinnik L.P.* Shear wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath the Kola peninsula // Geophysical Research Letters. 1996. V. 23. No 23. P. 3389–3392. DOI:[10.1029/96GL03262](https://doi.org/10.1029/96GL03262)

## **NEW DATA ON THE STRUCTURE OF THE EARTH'S CRUST AND UPPER MANTLE OF THE KOLA REGION FROM RECEIVER FUNCTION TECHNIQUE**

Goev A.G.

*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [andr.goev@gmail.com](mailto:andr.goev@gmail.com)*

УДК 550.34+550.8.052

## РЕГИСТРАЦИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫМ АКУСТИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ (DAS), РАЗМЕЩЕННЫМ НА МЕЛКОВОДЬЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

Горшков Б.Г.<sup>1</sup>, Ильинский Д.А.<sup>2</sup>, Симикин Д.Е.<sup>3</sup>, Таранов М.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup> ООО «ПетроФайбер», г. Новомосковск, Тульская область, Россия

E-mail: [bgorshkov@gmail.com](mailto:bgorshkov@gmail.com)

(устный доклад)

**Аннотация.** Приводятся примеры регистрации состоявшихся в 2021 году землетрясений магнитудой от 4.9 до 7.4 с эпицентрами от Турции до Моря Флорес. Прием сейсмических сигналов выполнялся с помощью оптического кабеля длиной до 10 км, уложенного на мелководье Черного моря, с помощью прибора ВОСК-А, разработанного ООО «ПетроФайбер».

**Ключевые слова:** волоконный датчик, сейсмические события, регистрация землетрясений, волоконно-оптический датчик, оптическая коса, DAS

В последнее десятилетие бурно развивается технология распределенных волоконно-оптических датчиков. С их помощью измеряется температурное распределение, механические деформации, как статические, так и динамические. Применительно к задаче регистрации сейсмических событий особое место занимают так называемые распределенные акустические датчики (общепринятая аббревиатура DAS – Distributed Acoustic Sensor), в которых чувствительный оптический кабель виртуально разбивается на чувствительные участки длиной 5...20 м, каждый из которых регистрирует динамические деформации независимо. Таким образом, DAS эквивалентен сейсмокоде, содержащей сотни или тысячи виртуальных точечных датчиков [Gorshkov et al., 2022b]. За рубежом начали появляться публикации, посвященные регистрации землетрясений, вулканических проявлений и пр. [Hernández et al., 2021; Landrø et al., 2022; Lindsey et al., 2017].

Нами произведена укладка оптического кабеля на дно Черного моря вблизи Геленджика. Кабель опрашивался DAS разработки ООО «ПетроФайбер», описанный нами в работе [Gorshkov et al., 2022a]. В течение 2021 года зарегистрировано до 10 землетрясений с эпицентром в Турции, Иране, Море Флорес. Приведем некоторые результаты по землетрясению около Стамбула, Турция, произошедшего 17 ноября 2021 г. в 12-40 (GMT), *mb* 4.9.

Самыми сильными по амплитуде оказались постоянно регистрируемые так называемые гравитационные волны с периодом около 7 с. На рис. 1 показан сигнал в одном из пространственных каналов DAS без фильтрации. Видно, что сейсмическая компонента сигнала более высокочастотна, однако ее амплитуда составляет не более 10% от амплитуды

гравитационных волн. Выделение преобладающей частоты в диапазоне 1.7–2.3 Гц позволяет получить картину волнового поля, показанную на рис. 2. Масштаб рисунка не позволяет видеть детали, однако они многочисленны и обладают интересными особенностями. В качестве примера таких деталей на рис. 3 приведен сигнал в пространственном канале 6250 м волнового поля. Указанный сигнал обнаруживает особенности, характерные для землетрясения. При этом влияние гравитационных волн практически полностью устранено.

Следует отметить, что сигналы существенно различаются на различных участках оптического кабеля как по амплитуде, так и по спектру; наблюдаются резонансные явления и сигналы от близко расположенных вторичных источников волн.

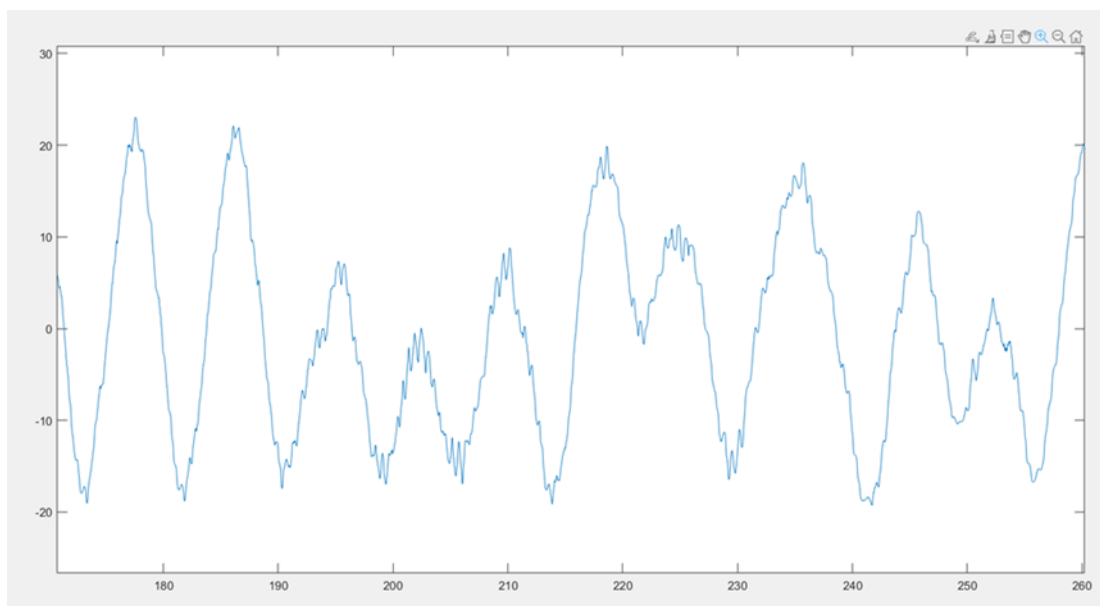


Рис. 1. Сейсмограмма землетрясения с эпицентром в Турции на фоне гравитационных волн. По вертикальной оси – фазовый набег в радианах; по горизонтальной – время в секундах

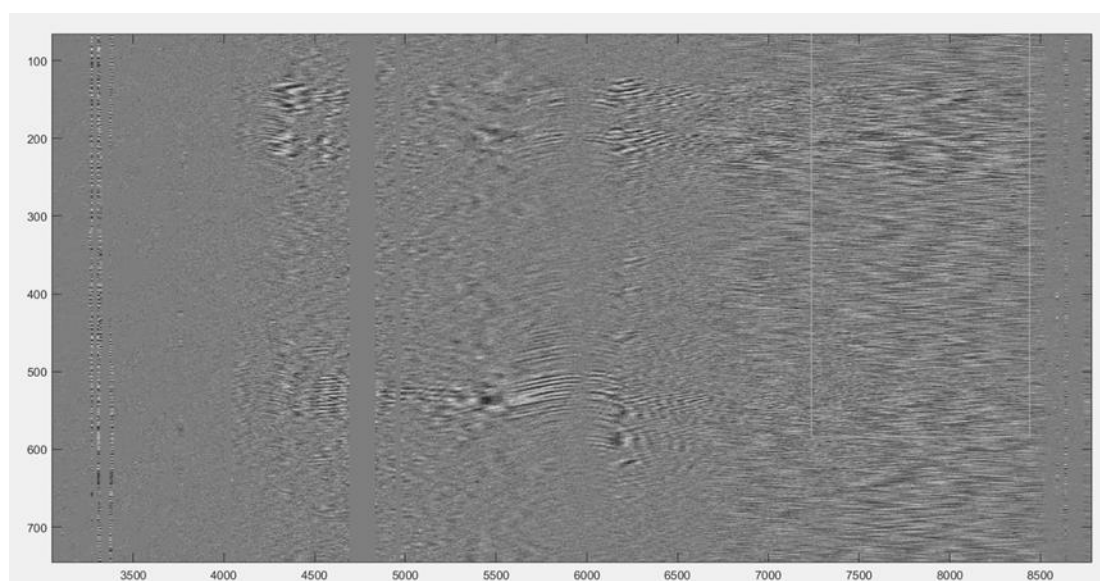


Рис. 2. Волновое поле землетрясения с эпицентром в Турции в диапазоне частот 1.7–2.3 Гц. По вертикальной оси – время в секундах; по горизонтальной – пространственная координата вдоль оптического кабеля в метрах

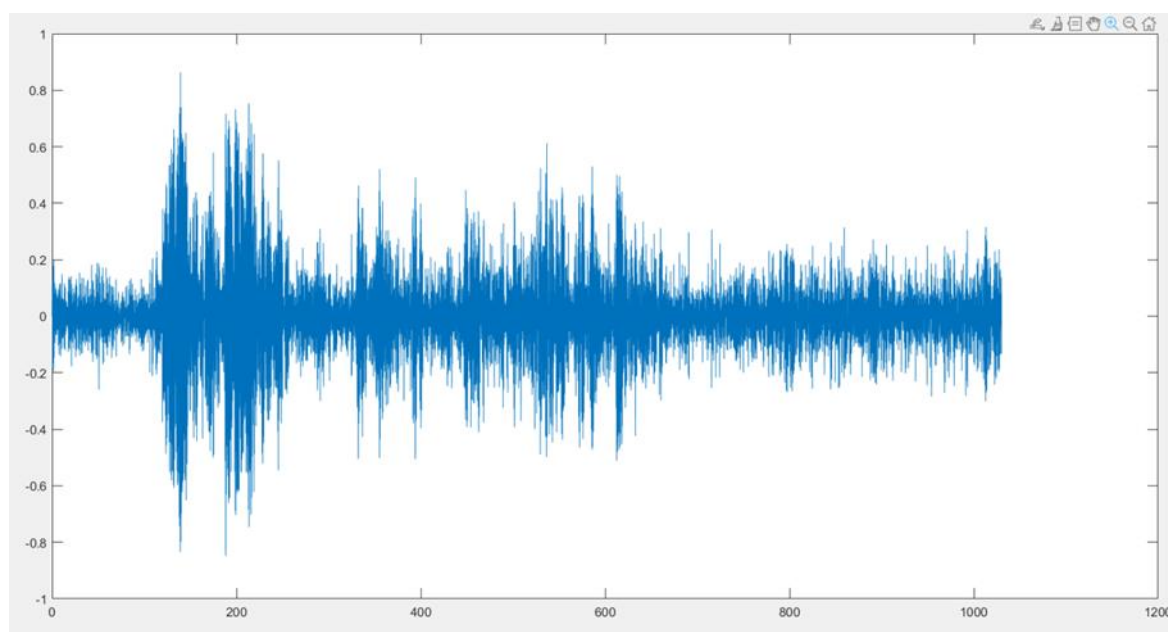


Рис. 3. Сейсмограмма землетрясения с эпицентром в Турции в диапазоне частот 1.7–2.3 Гц; пространственный канал 6250 м. По вертикальной оси – фазовый набег в радианах; по горизонтальной – время в секундах

### Литература

- Gorshkov B.G., Alekseev A.E., Taranov M.A., Simikin D.E., Potapov V.T., Ilinskiy D.A. Low noise distributed acoustic sensor for seismology applications // *Applied Optics*. 2022a. V. 61. P. 8308–8316. DOI:[10.1364/AO.468804](https://doi.org/10.1364/AO.468804)
- Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Turov A.T., Konstantinov Y.A., Lobach I.A. Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective // *Sensors*. 2022b. V. 22. No 3. Article 1033. DOI:[10.3390/s22031033](https://doi.org/10.3390/s22031033)
- Hernández P.D., Ramírez J.A., Soto M.A. Deep-learning-based earthquake detection for fiber-optic distributed acoustic sensing // *Journal of Lightwave Technology*. 2021. V. 40. No 8. P. 2639–2650. DOI:[10.1109/JLT.2021.3138724](https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3138724)
- Landrø M., Bouffaut L., Kriesell H.J., Potter J.R., Rørstadbotnen R.A., Taweessintananon K., Storvik F. Sensing whales, storms, ships and earthquakes using an Arctic fibre optic cable // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. Article 19226. DOI:[10.1038/s41598-022-23606-x](https://doi.org/10.1038/s41598-022-23606-x)
- Lindsey N.J., Martin E.R., Dreger D.S., Freifeld B., Cole S., James S.R., Biondi B.L., Ajo-Franklin J.B. Fiber-optic network observations of earthquake wave fields // *Geophysical Research Letters*. 2017. V. 44. No 23. P. 11792–11799. DOI:[10.1002/2017GL075722](https://doi.org/10.1002/2017GL075722)

## EARTHQUAKE DETECTION WITH A DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSOR (DAS) DEPLOYED IN SHALLOW WATER OF THE BLACK SEA

Gorshkov B.G.<sup>1</sup>, Ilinskiy D.A.<sup>2</sup>, Simikin D.E.<sup>3</sup>, Taranov M.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Prokhorov General Physics Institute, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup> PetroFibre LLC, Novomoskovsk, Tula region, Russia

E-mail: [bggorshkov@gmail.com](mailto:bggorshkov@gmail.com)



УДК 550.8.08

## ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ СБОРА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ: СПОСОБЫ ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Гравиров В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия*

E-mail: [gravirov@mail.ru](mailto:gravirov@mail.ru)

(стендовый доклад)

**Аннотация.** Сегодня практически весь спектр геофизических наблюдений производится в цифровом формате. Для этого используются самые разнообразные цифровые системы сбора информации. Основой всех подобных систем являются аналого-цифровые преобразователи (АЦП), которые могут быть реализованы в виде как микросхем, так и самостоятельных электронных блоков или плат. К сожалению, зачастую в ходе проведения полевых работ геофизиками не уделяется должного внимания контролю правильности функционирования используемых АЦП и оперативной оценке качества их работы. Особую остроту данный вопрос обретает при проведении работ вдали от цивилизации, где принципиально отсутствует какое-либо дорогостоящее и зачастую тяжелое и сложное сервисное оборудование. В данной работе предложены простейшие способы проверки работоспособности практически любых АЦП, показано, как, используя самое простое оборудование и приборы, можно произвести первичную оценку и поверку практически любой цифровой системы сбора информации. Как правило, геофизические системы сбора являются 3-компонентными. В этом случае, проведя всего три испытания (по очереди меняя входные сигналы на каждом входе), можно выявить как значения критических параметров АЦП, так и их основные неисправности. В качестве генератора испытательного тестового сигнала можно использовать простую схему генератора Вина, которая генерирует несимметричный относительно нуля гармонический сигнал. Таким образом, имея лишь простой генератор, батарейку и ноутбук, можно произвести оперативную оценку и поверку практически любой цифровой системы сбора информации, определить правильность аналого-цифрового преобразования и отображения входных напряжений, а также уровни межканальных проникновений и собственных шумов системы сбора.

**Ключевые слова:** цифровые системы сбора, аналого-цифровой преобразователь, проверка работоспособности

В современном мире информация является одним из ключевых факторов, определяющих успех предприятий, организаций и научных исследований. Цифровые системы сбора информации играют важную роль в обеспечении доступа к данным и их эффективному использованию. Цифровые системы сбора информации – это важный инструмент для сбора, обработки и анализа данных в различных отраслях. Они позволяют получать информацию о процессах, объектах и явлениях в режиме реального времени, что позволяет принимать более обоснованные решения и оптимизировать работы системы. Цифровые системы сбора информации представляют собой комплекс аппаратных и программных средств, предназначенных для получения, обработки, хранения и передачи данных. Они используются для мониторинга, контроля, анализа и управления различными

процессами и объектами. Основными компонентами цифровых систем сбора информации являются разнообразные датчики, устройства обработки, передачи и хранения данных, а также программное обеспечение для анализа и визуализации собранной информации. Датчики собирают первичные данные об объекте или процессе, преобразуют их в цифровой формат и передают на устройство обработки. Затем обработанные данные сохраняются на сервере или в облачном хранилище и становятся доступными для анализа.

Основными преимуществами цифровых систем сбора информации [Крюков, 2000] несомненно являются оперативность и точность получаемых данных, возможность удаленного мониторинга и управления процессами, а также простота интеграции с другими информационными системами. Кроме того, использование цифровых систем позволяет сократить затраты на сбор и обработку данных, а также повысить эффективность работы. Одним из основных преимуществ цифровых систем является возможность обработки больших объемов данных с высокой скоростью. Это позволяет анализировать данные в реальном времени и быстро реагировать на изменения в системе. Кроме того, цифровые системы обладают высокой точностью и надежностью, что обеспечивает получение достоверной информации. Еще одним преимуществом цифровых систем сбора информации является их гибкость. Они могут быть адаптированы для работы с различными типами данных и могут быть интегрированы с другими системами. Это позволяет создавать комплексные системы мониторинга и управления.

Таким образом, цифровые системы сбора информации являются неотъемлемым элементом современных информационных систем и способствуют повышению эффективности научных исследований в различных сферах. Дальнейшее развитие технологий и улучшение качества датчиков и устройств обработки данных будут способствовать расширению возможностей таких систем и повышению их точности и надежности.

Однако стоит отметить, что использование цифровых систем сбора информации требует определенных знаний и навыков от пользователей. Для эффективного использования таких систем необходимы навыки работы с программным обеспечением, знание основ обработки данных и умение анализировать полученные результаты.

Основой любых цифровых систем сбора информации являются аналого-цифровые преобразователи (АЦП) [Pelgrom, 2012], которые могут быть реализованы в виде как микросхем, так и самостоятельных электронных блоков или плат. К сожалению, зачастую в ходе проведения полевых работ геофизиками не уделяется должного внимания контролю правильности функционирования используемых АЦП и оперативной оценке качества их работы. Особую остроту данный вопрос обретает при проведении полевых работ вдали от цивилизации, где принципиально отсутствует какое-либо дорогостоящее и зачастую тяжелое

и сложное сервисное оборудование. Актуальность данного вопроса была нами практически доказана во время наших последних экспедиций как на Кавказ, так и в регионы Камчатского полуострова и Крайнего Севера.

В качестве основных параметров любых систем сбора информации [Gazi, 2018] можно считать:

1. Точность собранных данных.
2. Скорость сбора данных.
3. Надежность.
4. Масштабируемость.
5. Стоимость.
6. Количество и качество имеющихся интерфейсов.
7. Безопасность собранных данных (защита от несанкционированного проникновения).

Однако поскольку нас интересует именно качество функционирования систем сбора, то особое внимание должно быть уделено контролю основных критических параметров АЦП, входящих в их состав. Можно выделить следующие параметры:

1. Разрешающая способность или разрядность.
2. Динамический диапазон входных сигналов.
3. Погрешность смещения нуля.
4. Погрешность коэффициента усиления встроенных усилителей входного сигнала.
5. Нелинейность передаточной характеристики преобразования.
6. Шум квантования.
7. Дрейф нуля.

Конечно, многие из перечисленных параметров определяют качество используемой системы сбора и не меняются с течением времени эксплуатации, например, динамический диапазон и разрешающая способность закладываются при проектировании системы и остаются неизменными в течение всего срока эксплуатации. Но остальные требуют повышенного внимания и проведения периодических проверок, тестов и измерений, чтобы быть уверенными в полной работоспособности АЦП.

Как правило, геофизические системы сбора являются 3-компонентными, способными регистрировать компоненты: Север-Юг, Запад-Восток и Вертикальную составляющую. На практике можно утверждать, что для проверки подобных систем будет достаточно проведения периодически всего трех испытаний (рис. 1), в которых, по очереди меняя входные сигналы, на каждом входе можно определить как значение критических параметров, так и возможные основные неисправности.

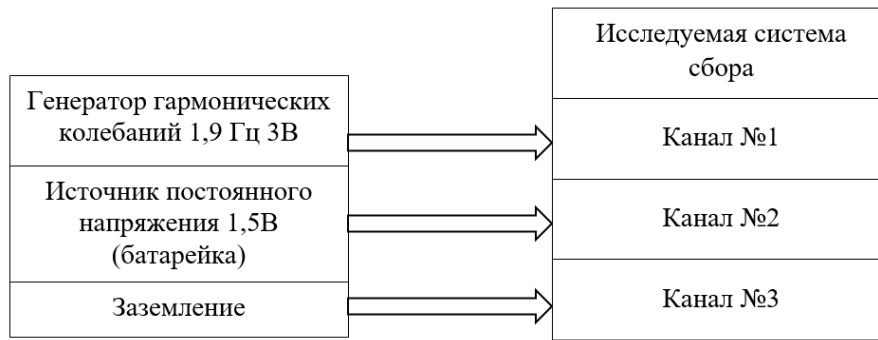


Рис. 1. Схема проведения базового эксперимента с системами сбора информации

В качестве тестового генератора можно использовать простую схему генератора Вина (рис. 2), которая генерирует несимметричный относительно нуля гармонический сигнал (пример которого представлен на рис. 3).

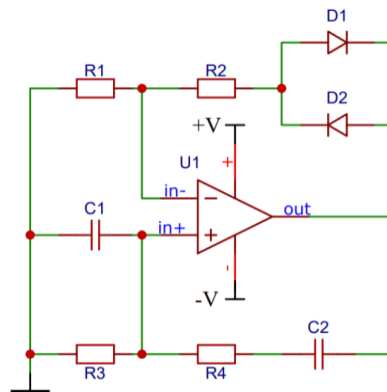


Рис. 2. Пример простейшей схемы генератора Вина на инструментальном операционном усилителе с системой автоматической стабилизации амплитуды

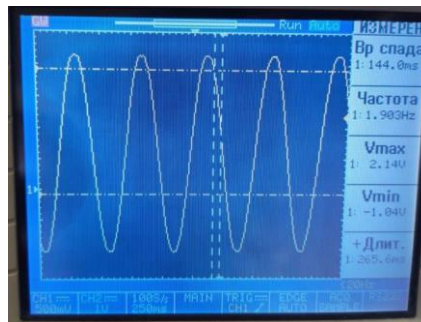


Рис. 3. Несимметричный относительно нуля (земли) гармонический сигнал, используемый для тестирования систем сбора

Проведение подобных экспериментов позволяет оперативно выявить основные неисправности цифровых систем сбора [Fornetti, 2013], включая: правильность аналого-цифрового преобразования входных напряжений и отображения входных напряжений, уровень межканальных проникновений и собственных шумов системы сбора, наличие, величину смещения и дрейф нуля, погрешность коэффициента усиления встроенных усилителей входного сигнала.

Таким образом, проведение периодического контроля критических параметров АЦП [Илюхин, 2020], входящих в состав геофизических систем сбора информации, является критически важным действием для обеспечения надежности, точности и долгосрочной стабильности работы подобных систем. Подобные испытания позволяют существенно увеличить достоверность и качество собираемых данных, а также способствуют улучшению управляемости и контролируемости систем, обеспечивая их более эффективное использование и безотказность функционирования.

### *Литература*

- Илюхин А.В., Зарипова И.И.* Устройства цифровой автоматики. М.: МАДИ, 2020. 144 с.
- Крюков В.В.* Системы сбора данных // Информационно-измерительные системы. Владивосток: ВГУЭС, 2000. 93 с.
- Fornetti F.* Instrumentation Control, Data Acquisition and Processing with MATLAB. Explore RF, 2013.
- Gazi O.* Understanding Digital Signal Processing. Springer Singapore, 2018. 303 p. DOI:[10.1007/978-981-10-4962-0](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4962-0)
- Pelgrom Marcel J.M.* Analog-to-digital conversion. Springer New York, 2012. 546 p. DOI:[10.1007/978-1-4614-1371-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1371-4)

## **GEOPHYSICAL DIGITAL DATA ACQUISITION SYSTEMS: METHODS FOR PERFORMANCE TESTING IN THE FIELD CONDITIONS**

Gravirov V.V.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [gravirov@mail.ru](mailto:gravirov@mail.ru)*

УДК 550.34.038.4

## РАСПРЕДЕЛЕННОЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ (DAS): НА ПУТИ К СТАНДАРТИЗАЦИИ

Гравиров В.В.<sup>1,2</sup>, Кислов К.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

E-mail: [gravirov@mail.ru](mailto:gravirov@mail.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** Распределенное акустическое зондирование (DAS) сегодня переживает экспоненциальный рост своего применения и развития. Следует отметить, что тем не менее существуют некоторые трудности в применении этой технологии для решения сейсмологических задач, однако основным препятствием является их недостаточная метрологическая стандартизация. Так, для каждого виртуального датчика (канала) требуется проводить большой объем работ по определению его положения, ориентации, передаточной функции и собственного шума и т. д. Конечно, часть метрологических характеристик можно оценить заранее, если известен тип кабеля, глубина и способ его прокладки, тип грунта и его уплотнение, а также местные условия в зоне прокладки кабеля. Естественно, необходимо проведение дополнительных исследований по влиянию этих параметров на метрологические характеристики систем, базирующихся на технологии DAS. Будет необходимо разработать упрощенные методы оценки базовых параметров, которые с достаточной точностью позволят использовать системы DAS. В настоящее время ведется большая работа по возможным областям применения DAS, её сравнению с традиционными сейсмическими датчиками и изучению отдельных метрологических характеристик. Каждое такое исследование имеет несомненную ценность, поскольку добавляет новый кирпичик в основу данной технологии. В этой работе мы описываем некоторые принципы и соображения, которые мы используем при планировании экспериментов с системами, основанными на распределенном акустическом зондировании.

**Ключевые слова:** распределенное акустическое зондирование, DAS, метрологическая стандартизация

Распределенное акустическое зондирование, или DAS, переживает сегодня этап экспоненциального развития, но тем не менее все еще остается много нерешенных проблем [Kislov, Gravirov, 2022a]. На наш взгляд, основные проблемы применения данной технологии зачастую носят метрологический характер. То есть текущей целью исследований уже является не улучшение отдельных параметров, а переход к единой метрологической базе. Следует отметить, что исследования в этом направлении успешно продолжаются. Очевидно, что необходимо разработать комплексный и единый набор параметров DAS, стандартизировать методы их описания, процесс подготовки работ, измерений и представления данных [Nikitin et al., 2023]. Большая работа в этом направлении была проделана при подготовке к месяцу мониторинга «Global DAS», который состоялся в феврале 2023 года. [Кислов, Никитин, 2023].

Первоначально предполагали, что, зная характеристики оптоволоконного кабеля, свойства грунта и условия прокладки кабеля, можно априорно оценить некоторые основные метрологические характеристики системы DAS, такие как передаточная функция, уровень шума и т. д. [Kislov, Gravirov, 2022b]. Это позволило бы в полной мере использовать данные DAS сразу после подключения оборудования к оптоволоконной линии связи в режиме реального времени. Но, к сожалению, практика показала, что это зачастую не совсем так.

Проиллюстрируем данное утверждение одним примером. В этом конкретном исследовании использовались данные, полученные компанией «T8 Sensor», с неглубоко закопанного оптического кабеля длиной 700 м, который эксплуатируется Астрономическим институтом Штернберга МГУ и расположен на Северном Кавказе в 20 км к югу от г. Кисловодска [Nikitin, Treshchikov, 2023]. Это стандартный оптический кабель, содержащий темное волокно, который был закопан под рыхлый слой почвы на скалистом основании на глубине 25–30 см.

Однородность кабеля, равномерность его прокладки по всей длине линии и одинаковые грунтовые условия давали надежду на то, что метрологические характеристики будут примерно одинаковыми по длине кабеля. Тем не менее, анализируя данные, полученные с оборудования подключенного к этому кабелю в течение месяца мониторинга «Global DAS» [Jousset *et al.*, 2023], мы, прежде всего, позаботились о сравнении сейсмических сигналов, пришедших с разных азимутов. Для этого оптический кабель был разделен на условно прямые участки (рис. 1). Были определены азимуты прихода сейсмических волн на каждом участке. Это позволило определить, насколько на уровень сигнала влияют местные геологические условия на путях распространения сейсмических волн и ориентация различных участков кабеля.

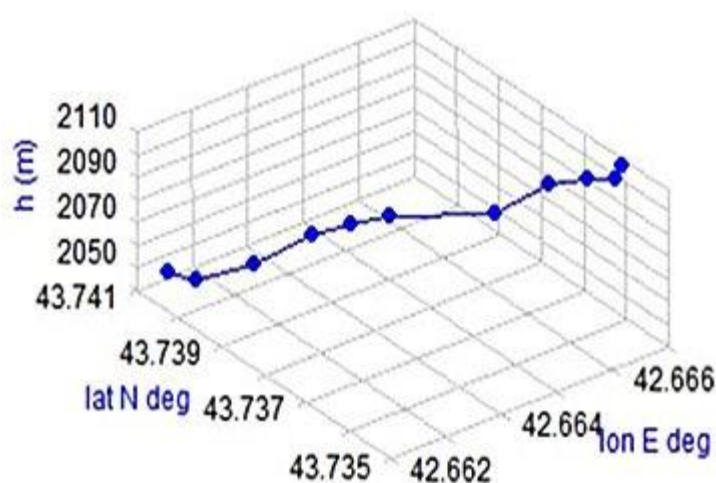


Рис. 1. Пример возможного разделения тестового оптического кабеля на прямые участки (рисунок любезно предоставлен Ю.О. Старовойтом)

Максимальный угол между отдельными частями кабеля составлял не более 110 градусов, поэтому влияние расположения осей чувствительности отдельных виртуальных датчиков должно было быть весьма значительным. Далее мы сравнили амплитуды сигналов разных каналов, которые должны были иметь схожий отклик.

Сравнение сигналов с виртуальных датчиков, расположенных на разных азимутах относительно источников сейсмических сигналов (рис. 2), показало, что амплитудная характеристика виртуальных датчиков существенно меньше зависит от угла падения сейсмической волны на ось кабеля, чем предполагалось ранее расчетами. Во-первых, это может быть связано с геологическими условиями по ходу распространения волны, во-вторых, с возможными изгибами и поворотами внутри кабеля, в-третьих, с тем, что оптическое волокно было намотано на жилу кабеля.



Рис. 2. Основные источники сигналов (сигналы землетрясений), пришедшие на тестируемую DAS в течение месяца мониторинга «Global DAS» с разных азимутов

Оказалось, что амплитудные характеристики разных датчиков могут значительно отличаться. И чаще всего соседние или близлежащие датчики имели аналогичные характеристики. Это говорит о том, что незначительные изменения условий прокладки кабеля оказывают не столь существенное влияние на передаточную функцию виртуальных датчиков (рис. 3).

Таким образом, первоначальные оценки метрологических характеристик DAS уже проложенных кабелей связи зачастую не могут удовлетворить большинству требований



и поэтому бесполезны. Мы не уверены, только ли этот тип кабеля, такие грунтовые условия и такой способ прокладки кабеля могут создавать такой эффект. Но, скорее всего, это справедливо для всех случаев использования оптических кабелей связи. Следовательно, метрологические характеристики для каждого кабеля должны определяться отдельно (до, во время или после измерений).

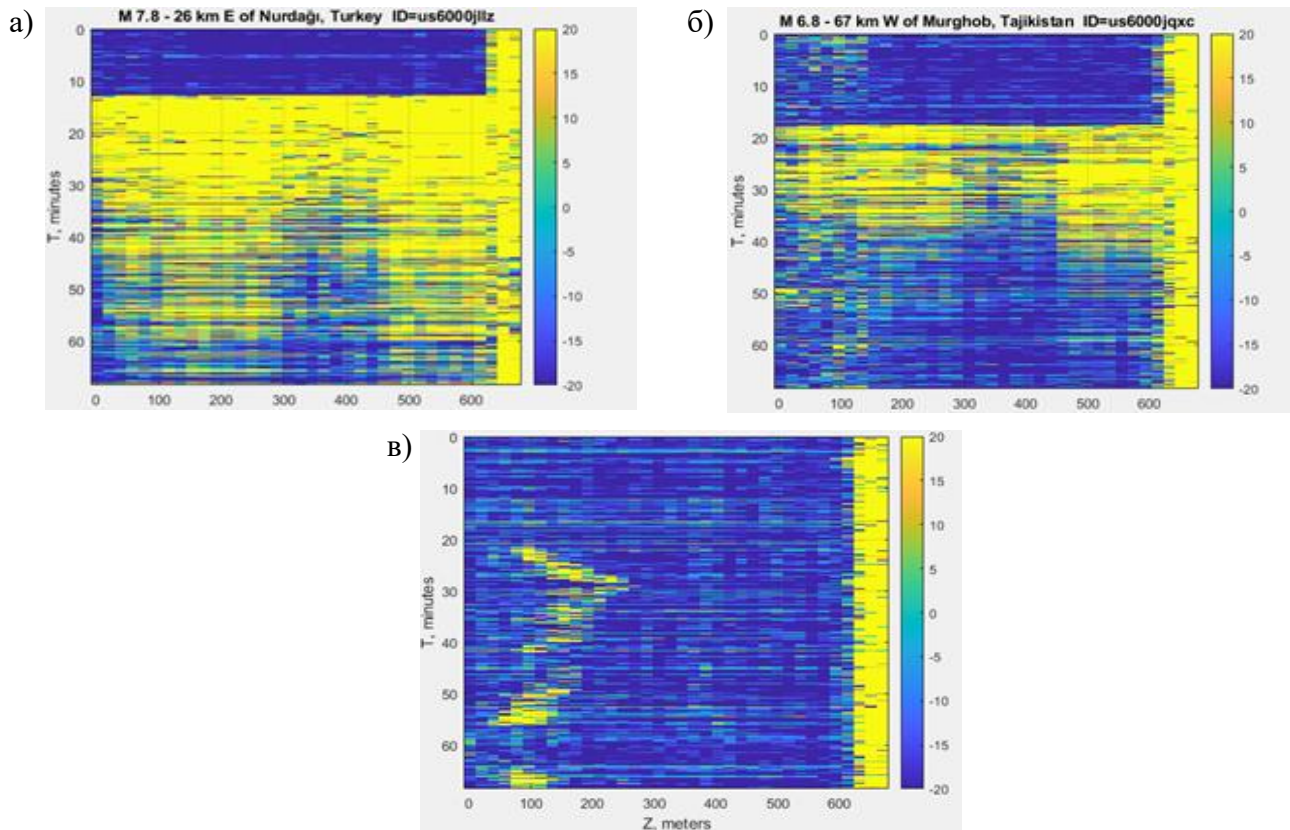


Рис. 3. Сейсмограммы основных зарегистрированных землетрясений, пришедшие на тестируемую DAS в течение месяца мониторинга «Global DAS»: а) Газиантеп, Турция  $\Delta \sim 850$  км,  $M 7.8$ ; б) Мургаб, Таджикистан  $\Delta \sim 2700$  км,  $M 6.8$ ; в) локальный шум

Конечно, для максимально полной реализации возможностей DAS можно использовать специальные волокна и проводить их тщательную укладку. Однако такие кабели значительно дороже и требуют особых методов их прокладки. То есть в этом случае исчезает одно из главных преимуществ DAS, а именно возможность использования уже существующих оптических линий связи. Кроме того, использование специальных волокон не устраняет полностью метрологические проблемы [Kislov, Gravirov, 2023c].

### Литература

Кислов К.В., Никитин С.П. Телесеismicкий мониторинг «Глобальный месяц распределенного акустического зондирования»: опыт, современное состояние и тенденции // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». Республика Адыгея, Майкоп. 2023. Ч. 1. С. 155–165.

- Jousset P., Wuestefeld A., Krawczyk C., Baird A., Currenti G., Landrø M., Nowacki A., Spica Z., Barajas S.R., Lindner F., Konca Ö.A., Edme P., Lai V.H., Treshchikov V., Urmantseva L., Morten J.P., Lienhart W., Lipovsky B.P., Schoenball M., Ma K.-F., the “DAS-month” team. Global Distributed Fibre Optic Sensing recordings of the February 2023 Turkey earthquake sequence // EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-17618, 2023. DOI:[10.5194/egusphere-egu23-17618](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-17618)
- Kislov K.V., Gravirov V.V. Distributed acoustic sensing: a new tool or a new paradigm // Seismic Instruments. 2022a. V. 5. P. 485–508. DOI:[10.3103/S0747923922050085](https://doi.org/10.3103/S0747923922050085)
- Kislov K.V., Gravirov V.V. Acquisition of Seismological Data Using Fiber Optic Communication Lines // XIV International Conference and School “Problems of Geocosmos–2022”, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, 2022b. GC2022-SG008.
- Kislov K.V., Gravirov V.V. Regarding the Metrology of Special Lines of the Distributed Acoustic Sensing // XIV International Conference and School “Problems of Geocosmos–2022”, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, 2022c. GC2022-SG009.
- Nikitin S., Treshchikov V. Global DAS month experiment, T8\_Sensor-Caucasus dataset // International Federation of Digital Seismograph Networks. Dataset/Seismic Network. 2023. DOI:[10.7914/t8my-dk69](https://doi.org/10.7914/t8my-dk69)
- Nikitin S.P., Kislov K.V., Starovoi Yu.O., Bengalskii D.M., Spiridonov E.P., Kharasov D.R., Fomiryakov E.A., Nanii O.E., Treshchikov V.N. Possibilities and Prospects for the Use of Distributed Fiber Sensors in Geophysics // Instruments and Experimental Techniques. 2023. V. 66. No 5. P. 854–859. DOI:[10.1134/S0020441223050196](https://doi.org/10.1134/S0020441223050196)

## **DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSING (DAS): TOWARDS STANDARDIZATION**

Gravirov V.V.<sup>1,2</sup>, Kislov K.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [gravirov@mail.ru](mailto:gravirov@mail.ru)*

УДК 550.34.034

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ПРИБОРНОГО КОМПЛЕКСА, УСТАНОВЛЕННОГО В ЛАБОРАТОРИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИФЗ РАН В ДАЛЬНЕЙ ШТОЛЬНЕ БНО

Гравиров В.В.<sup>1,2</sup>, Лиходеев Д.В.<sup>1</sup>, Кислов К.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия

E-mail: [gravirov@mail.ru](mailto:gravirov@mail.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** За последнее время был выполнен большой объем работ по дальнейшему совершенствованию приборного комплекса, установленного в подземной геофизической лаборатории ИФЗ РАН, расположенной в штольне горы Андырчи недалеко от вулкана Эльбрус. В настоящий момент комплекс включает в себя два прецизионных накломера систем Гриднева и Широкова, магнитовариационную станцию, прецизионные полупроводниковые измерители влажности и атмосферного давления в месте установки приборов, электронный барограф, 3-компонентный сейсмометр, лидарную станцию контроля выброса газов, а также высокоточный многоканальный комплекс измерения температур горной породы в нескольких точках наблюдений, включая электронные 24-битные системы сбора, обработки и хранения данных. В лаборатории проводится круглосуточный мониторинг параметров окружающей среды вокруг наклономеров, в том числе прецизионное измерение температуры окружающего воздуха, пьедестала и корпуса накломера с относительной точностью измерения около 0.001 градуса Цельсия, измерение влажности и атмосферного давления. Установленная высокочувствительная и безопасная для глаз LIDAR система помогает отслеживать аэрозоль, выделяемый трещинами в месте установки комплекса.

**Ключевые слова:** БНО, геофизическая лаборатория, наклономерные наблюдения, наклономер

Комплекс подземных сооружений Северо-Кавказской геофизической обсерватории является объектом научной инфраструктуры мирового уровня [Собисевич и др., 2008], уникальным как по своим эксплуатационным характеристикам, так и по возможностям комплексного анализа современных геодинамических процессов путем сравнения полученных данных с результатами наблюдений других геофизических параметров.

В настоящее время считается общепринятым, что самыми высокоточными методами регистрации геодеформационных процессов являются наклономерно-деформометрические наблюдения. В настоящее время уровень чувствительности (разрешения) этих методов достигает величин относительных деформаций порядка  $10^{-10}$  [Кузьмин и др., 2020; Тимофеев и др., 2019; Hodgkinson et al., 2013; Meurers et al., 2021].

В качестве основного инструмента измерения наклонов мы используем двух координатный наклономер Широкова, который был разработан еще в КБ ИФЗ АН СССР в середине 1990-х годов и с тех пор несколько раз модернизировался. Он способен измерять наклон поверхности относительно местной гравитационной вертикали в двух взаимно

перпендикулярных направлениях путем отклонения вертикального маятника с помощью емкостного датчика смещения. Диапазон измеряемых наклонов составляет  $\sim 2000$  угл. мс (далее просто мс) с погрешностью 0.1 мс. (Есть также грубый режим с десятикратным диапазоном и соответствующей точностью.) Заявленный диапазон измеряемых частот составляет от 0 до 0.005 Гц, но на практике регистрируются частоты от 0 до 0.1 Гц. Диапазон рабочих температур от  $+5$  до  $+45^{\circ}\text{C}$ ; заявленная производителем термическая стабильность составляет 500 мс/град. Коэффициент преобразования напряжения составляет 5 мВ/мс. Дрейф нуля не превышает 800 мс/год. Наклономер оснащен встроенной системой калибровки.

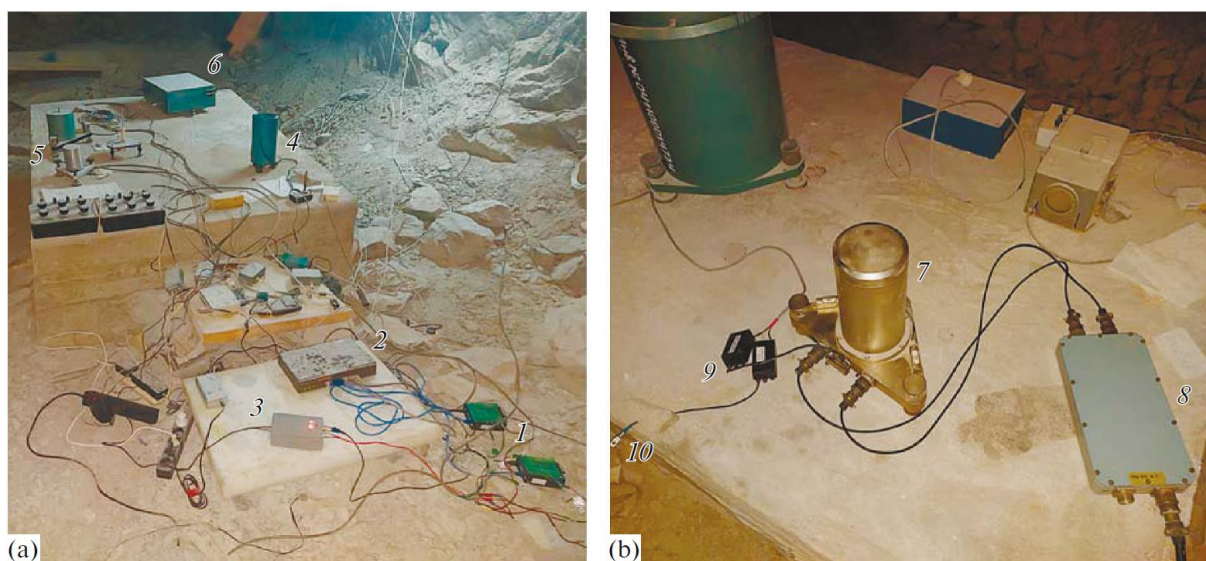


Рис. 1. Основные геофизические приборы, установленные на постаментах в лаборатории № 2:

- (а) Постамент № 1: 1 – набор внешних блоков АЦП типа ZET220, входящих в комплексную систему сбора геофизической информации; 2 – Ethernet-свитч с внешним модулем оптической связи по оптоволоконному кабелю; 3 – управляемый блок питания датчиков температуры (БП-2); 4 – электронный барограф с встроенными интегральными датчиками влажности и температуры; 5 – наклономер Гриднева; 6 – трехосная магнитовариационная станция;
- (б) Постамент № 2: 7 – наклономер Широкова; 8 – блок электроники наклономера Широкова; 9 – модули электроники системы прецизионного температурного мониторинга для измерения температуры постамента и внутренней температуры наклономера Широкова; 10 – чувствительный элемент (выносной датчик температуры) для измерения температуры постамента

На рис. 2 представлена созданная структурная схема цифровой системы сбора геофизической информации. Как видно из схемы, почти половина активных измерительных каналов предназначена для измерения служебных параметров, характеризующих состояние окружающей среды и оборудования, то есть условий измерения. Довольно часто при организации мониторинга таким измерениям не уделяется должного внимания, и для регистрации геофизических величин используются практически все доступные каналы регистрации. Считается, что использование прецизионного оборудования, термостойкой

электроники, цифровой записи и т. п. само по себе обеспечивает достаточную точность измерений.

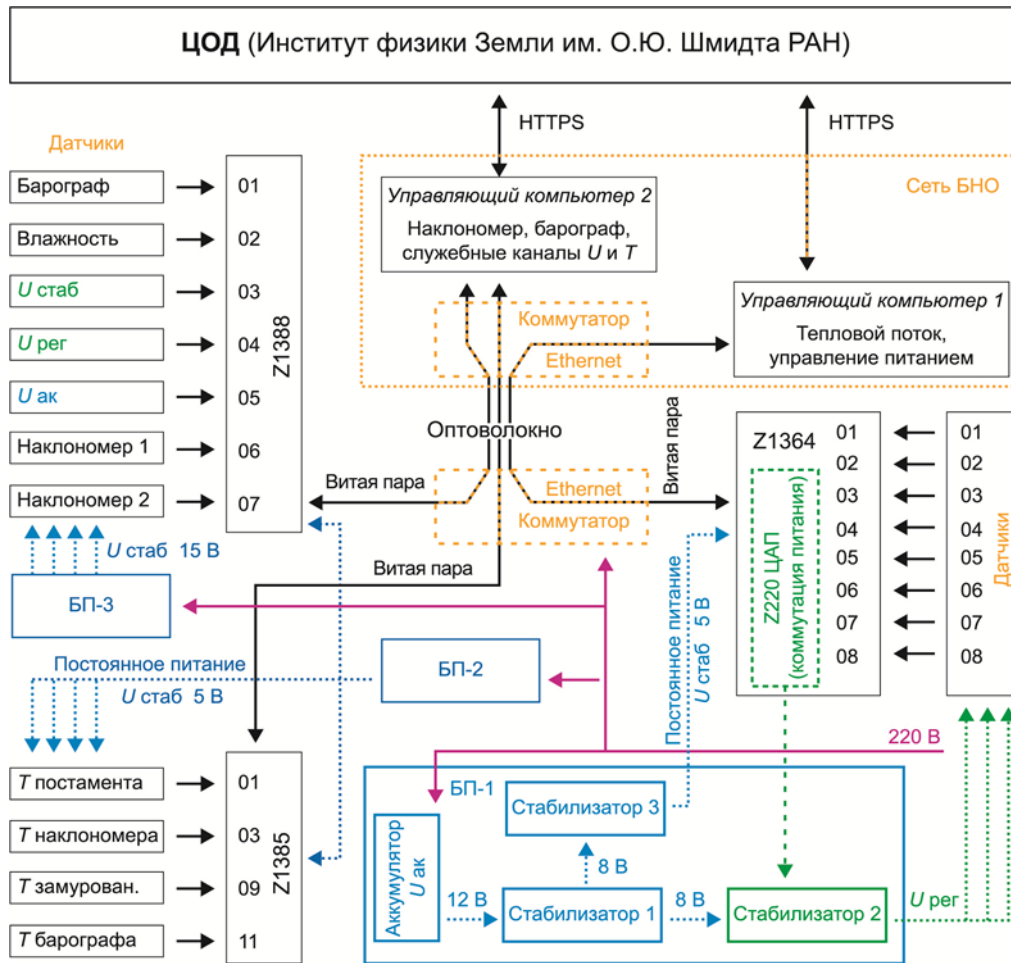


Рис. 2. Обобщенная структурная схема системы сбора информации, показывающая основные связи между датчиками, приборами и системой регистрации данных, установленной в обитаемой части лаборатории № 2

Однако опыт показывает, что обеспечить полную стабильность характеристик оборудования при натурных наблюдениях практически невозможно [Гаврилов и др., 2016; Гаврилов и др., 2021; Гравиров, Кислов, 2008; Децеровский и др., 2019; Кислов, Гравиров, 2008; Кислов, Гравиров 2013]. Таким образом, получение высококачественных цифровых записей является на сегодняшний день серьезной технологической задачей. В первую очередь это связано с приближением разрешений научных приборов к физически достижимому пределу. Кроме того, на пути повышения чувствительности датчиков возникают различного рода помехи, включая помехи, создаваемые изменением параметров окружающей среды. В то же время теоретический анализ такого влияния внешней среды на приборы зачастую весьма сложен, а его характер неоднозначен, труден для интерпретации, меняется от одного места наблюдения к другому и от экземпляра одного и того же прибора. Однако если считать чувствительную систему любого прибора суммирующей, то можно рассмотреть все виды помех отдельно, а также попытаться оценить и уменьшить их влияние.

В ходе работ полевой рекогносцировки в июне 2022 года точки ранее проведенного маркшейдерского плана, отмеченные на архивных маркшейдерских чертежах, были не обнаружены, поэтому было принято решение о создании нового геодезически-маркшейдерского плана геофизической лаборатории. Полученная маркшейдерская схема была сверена с архивными координатами элементов штолен. Полученная таким образом оценка погрешности направлений по результатам сравнения координат и дирекционных углов на контрольной линии составила  $00^{\circ}02'$ , что соответствует требуемой точности ориентации наклономеров [Gravirov et al., 2022].

В ходе выполнения теоретических и экспериментальных исследований в Северо-Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН были получены новые научные результаты, способствующие дальнейшему развитию систем геофизических инструментальных наблюдений, в том числе модернизация программно-технических средств прецизионного наклономерного мониторинга и разработка методики минимизации особого класса помех с последующей аппроксимацией фрагментов сигнала линейными функциями, позволяющей компенсировать эффекты, связанные с разрывами потока экспериментальных данных.

Была организована система хранения данных натурального эксперимента посредством пополняемой базы данных, содержащей помимо основных наклонных измерений также ряд вспомогательных параметров (контроль условий окружающей среды в месте наблюдения и технического состояния основных электронных блоков и измерительного оборудования). Предложен и успешно апробирован дифференциальный алгоритм экспресс-оценки основных приливных параметров, позволяющий получать значимые результаты для зашумленных и фрагментированных исходных сигналов. Анализ реальных данных накломера продемонстрировал эффективность алгоритма, позволяющего существенно повысить точность оценки приливных параметров по сравнению со стандартными методами оценки гармоник в случаях, когда ряды данных содержат значительные пробелы в наблюдениях.

Сделаны сравнительные оценки теоретических и наблюдаемых амплитуд вариаций приливного наклона в целом, а также волны M2. Результаты оценок будут востребованы для фундаментальных научных исследований в области региональной геодинамики, в том числе исследований по учету влияния локальных неоднородностей вулканического центра Эльбруса на естественные земные приливные вариации.

### *Литература*

Гаврилов В.А., Децеровский А.В., Полтавцева Е.В., Сидорин А.Я. Технологии предварительной обработки данных комплексного геофизического мониторинга и опыт их применения в системе геоакустических наблюдений на Камчатке // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 4. С. 57–75. DOI:[10.21455/si2016.4-5](https://doi.org/10.21455/si2016.4-5)

- Гаврилов В.А., Децеровский А.В., Власов Ю.А., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В., Федористов О.В., Денисенко В.П. Сеть комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57. № 3. С. 52–78.
- Гравиров В.В., Кислов К.В. Критичность сейсмометра к вариациям параметров // Исследовано в России. 2008. № 26. С. 301–312.
- Децеровский А.В., Сидорин А.Я., Фаттахов Е.А. Комплексная методика описания и фильтрации экзогенных эффектов в данных мониторинга, учитывающая вид наблюдений и дефекты экспериментальных данных // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98. № 2. С. 25–60. DOI:[10.21455/std2019.2-2](https://doi.org/10.21455/std2019.2-2)
- Кислов К.В., Гравиров В.В. Исследование влияния окружающей среды на шум широкополосной сейсмической аппаратуры / Вычислительная сейсмология. М.: КРАСАНД, 2013. 240 с. ISBN 978-5-396-00626-3
- Кислов К.В., Гравиров В.В. Шумы упругих элементов сейсмической аппаратуры // Естественные и технические науки. 2008. Т. 37. № 5. С. 142–148.
- Кузьмин Ю.О., Фаттахов Е.А., Широков И.А. Анализ долговременной стабильности регистрации наклонов параллельными приборами, установленными на едином постаменте // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. № 4. С. 57–67. DOI:[10.21455/si2020.4-4](https://doi.org/10.21455/si2020.4-4)
- Собисевич А.Л., Гриднев Д.Г., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х. Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории // Сейсмические приборы. 2008. Т. 14. № 1. С. 21–42.
- Тимофеев В.Ю., Тимофеев А.В., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В. Кварцевые наклонометры и опыт их использования в геофизических исследованиях // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55. № 3. С. 24–47.
- Gravirov V.V., Deshcherevskii A.V., Kuzmin Y.O. et al. Improvements in High-Precision Tiltmeter Instrument Systems Located in an Underground Geophysical Observatory // Seismic Instruments. 2022. V. 58. P. 363–378. DOI:[10.3103/S0747923922040041](https://doi.org/10.3103/S0747923922040041)
- Hodgkinson K., Langbein J., Henderson B., Mencin D., Borsa A. Tidal calibration of Plate Boundary Observatory borehole strainmeters // Journal of Geophysical Research. 2013. V. 118. No 1. P. 447–458. DOI:[10.1029/2012JB009651](https://doi.org/10.1029/2012JB009651)
- Meurers B., Papp G., Ruotsalainen H., Benedek J., Leonhardt R. Hydrological signals in tilt and gravity residuals at Conrad Observatory (Austria) // Hydrology and Earth System Sciences. 2021. V. 25. P. 217–236. DOI:[10.5194/hess-25-217-2021](https://doi.org/10.5194/hess-25-217-2021)

**IMPROVING THE GEOPHYSICAL INSTRUMENTATION COMPLEX INSTALLED  
IN THE LABORATORY OF GEOPHYSICAL RESEARCH AT THE IPE RAS  
IN THE FAR ADIT OF THE BNO**

Gravirov V.V.<sup>1,2</sup>, Likhodeev D.V.<sup>1</sup>, Kislov K.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia

E-mail: [gravirov@mail.ru](mailto:gravirov@mail.ru)

УДК 550.34.013.2

## АНАЛИЗ ИЗВЕРЖЕНИЯ ИСЛАНДСКОГО ВУЛКАНА БАРДАРБУНГА 2015 ГОДА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ РЕЖИМА СЕЙСМИЧНОСТИ

Греков Е.М.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, Москва, Россия*

*E-mail: [grekov.em16@physics.msu.ru](mailto:grekov.em16@physics.msu.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** В работе была выделена по пространству и времени характерная часть сейсмического каталога Исландии, которая в соответствии с отчётами об извержении и геологической информации предположительно связана с вулканическими процессами, происходившими в рое трещин при извержении вулкана Бардарбунга (Bárðarbunga) 2014–2015 гг. Затем вслед за многими другими исследованиями вулканической сейсмичности были проанализированы временные вариации наклона графика повторяемости (*b*-value) с целью выявить уже известную аномалию параметра, предположительно являющуюся предвестником извержений, и уточнить, с какими именно процессами она связана. Также особое внимание было уделено анализу кластеризации землетрясений, поскольку есть основания предполагать, что этот параметр связан с характером процесса, инициирующим сейсмичность, таким образом, для вулканической сейсмичности степень кластеризации должна отличаться от тектонической. Следовательно, это может служить критерием различия сейсмических режимов разной природы. К тому же параметр кластеризации может послужить новым предвестником извержений, если следовать гипотезе о том, что он характеризует напряжённое состояние среды. Однако эти вопросы требуют дальнейшего изучения.

**Ключевые слова:** сейсмология, вулканическая сейсмичность, кластеризация событий, наклон графика повторяемости

Объектом исследования является исландский вулкан Бардарбунга и его извержение 2015 года. А точнее, вулканический процесс, происходивший в рое трещин этого вулкана (рис. 1). Сейсмический каталог, а также информация о ходе извержения и структуре вулкана взяты с сайта метеорологической службы Исландии (<https://en.vedur.is>).

Этот процесс представляет особый интерес, поскольку есть основания полагать, что это в большой степени именно вулканическая сейсмичность с низкой долей тектонической. Задолго до извержения 2015 года в этом участке практически не зарегистрировано сейсмичности, поскольку качественная регистрация стала возможна только 17 августа, когда метеорологической службой Исландии была установлена локальная сеть. На рис. 2 видно, что за несколько дней до начала извержения активность растёт; происходит процесс, который проявляется как миграция облака сейсмичности вдоль роя трещин в сторону плато Холухраун (Holuhraun), где 29 августа началось истечение лавы на поверхность, длившееся до 27 февраля 2015 года, также сопровождавшееся сейсмичностью.



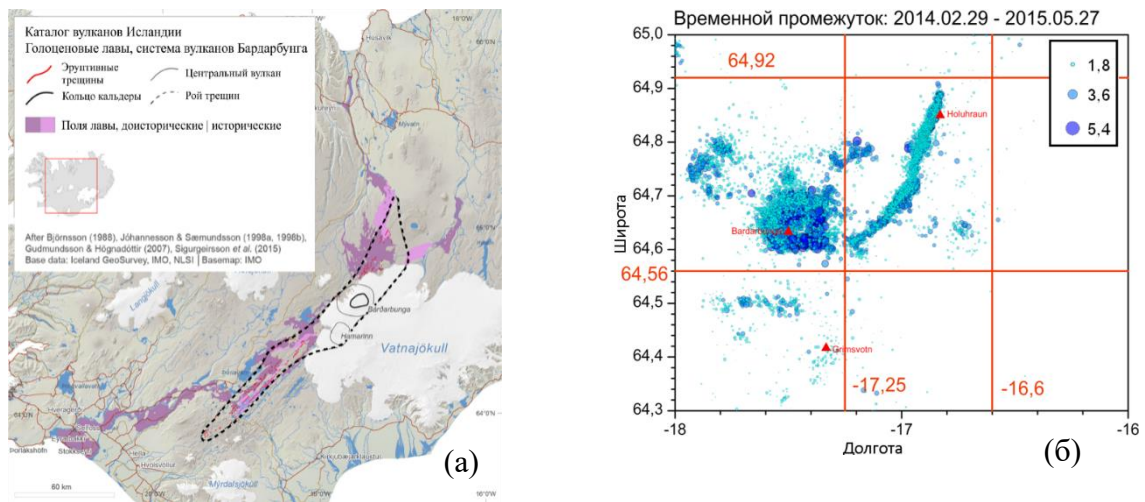


Рис. 1. (а) вулканическая система Бардарбунга с центральным вулканом и большим роём трещин [Larsen, Guðmundsson, 2019]. Черная жирная линия – центральная кальдера, тонкая черная линия охватывает вулканические постройки; темные фиолетовые области – зоны застывшей древней лавы; светлые фиолетовые области – зоны современной застывшей лавы; красные линии – эруптивные трещины, пунктирная линия охватывает рою трещин вулканической системы. (б) пространственное распределение сейсмических событий, приуроченных к извержению вулкана Бардарбунга (BAR) 2015 года. Чем больше размер кружка и темнее цвет, тем больше магнитуда события, красными линиями выделена исследуемая область

Одна из возможных интерпретаций такова: сперва магма под давлением продвигается из подземной камеры по старым закрытым каналам и трещинам, раскрывая их – это первый процесс, события которого, видимо, можно идентифицировать как вулкано-тектонические, а затем после начала извержения сейсмичность создаётся, вероятно, дегазацией магмы, вытекающей на поверхность (рис. 2). Естественно, это является гипотезой, потому что однозначно подтвердить эти суждения не удалось.



Рис. 2. Распределение событий во времени для процесса, связанного с движением магмы по рою трещин к плато Холухраун (HOL) во время извержения вулкана Бардарбунга 2015 года. Оранжевая линия – активность. Большими красными стрелками показаны периоды предполагаемых стадий вулканического процесса. Красными линиями показаны времена начала и конца извержения. Зеленая линия соответствует дате 17.08.2014

Вслед за другими исследованиями сперва были проанализированы временные вариации наклона графика повторяемости ( $b$ -value). В результате была обнаружена уже

известная из других работ (например, [Jacobs, McNutt, 2010; Novelo-Casanova et al., 2006; Chiba, Shimizu, 2018]) аномалия параметра  $b$ , которая часто предшествует извержениям. Она заключается в резком росте значения  $b$  с последующим резким падением незадолго перед извержением (рис. 3).

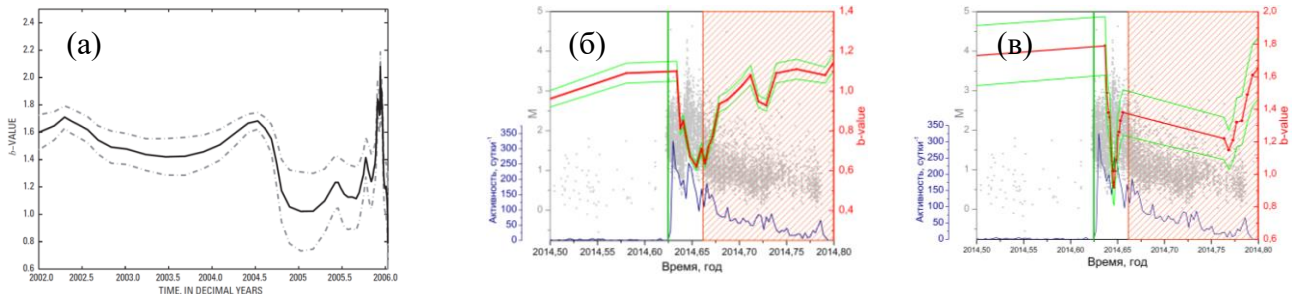


Рис. 3. (а) временные вариации  $b$ -value перед извержением вулкана Августина 2006 года из работы [Jacobs, McNutt, 2010]. (б) – (в) временные вариации  $b$ -value, полученные в работе для событий, приуроченных к движению магмы по рою трещин во время извержения исландского вулкана Бардарбунга (BAR) 2015 года (29.08.2014–27.02.2015). Серые точки – сейсмические события, тёмно-синий – активность, красная линия – наклон графика повторяемости ( $b$ -value), зелёные линии – погрешность наклона графика повторяемости ( $b$ -value), оранжевой областью обозначено извержение. Зелёная вертикальная линия соответствует дате 17.08.2014. (б) представительная магнитуда оценивается в скользящем окне по максимальной кривизне графика; окно выбирается так, чтобы в нём оказалось 300 представительных событий, перекрытие окон 250 событий. (в) фиксированная представительная магнитуда равная 2.6; окно шириной 100 представительных событий, сдвиг окна 10 событий

Оценка параметра  $b$  для вулканической сейсмичности осложняется сильными вариациями представительной магнитуды во времени, а также наличием графиков повторяемости с двойным наклоном. Поэтому к абсолютным значениям параметра стоит относиться с осторожностью. В работе для расчёта вариаций  $b$ -value использовалось несколько методов, которые показывают довольно разные значения  $b$ , однако в большинстве случаев прослеживается аномалия указанной выше формы. В нашем случае рост значения может быть обрезан отсутствием записи событий до 17 августа, зато далее наблюдается ярко выраженное падение значения. Важно, что, учитывая вышесказанное, можно предположить, что данная аномалия связана с событиями первой стадии вулкано-тектонического типа.

Затем особое внимание было уделено кластеризации сейсмических событий. В исследовании используется метод ближайшего соседа, который заключается в вычислении обобщённых расстояний по формуле из работы [Baiesi, Paczuski, 2004].

Затем строится распределение расстояний до ближайшего соседа. В других работах (например, [Shebalin et al., 2020]) показано, что для тектонической сейсмичности такое распределение обычно является бимодальным, то есть имеется группа событий, которые в среднем расположены ближе друг к другу и которые расположены дальше друг от друга. Предполагается, что правый пик соответствует фоновым событиям, а левый –

кластеризованным. Это также было подтверждено на модельных данных [Zaliapin et al., 2008].

Однако оказалось, что для выделенных выше процессов на распределении отсутствует ярко выраженная бимодальность (рис. 4).

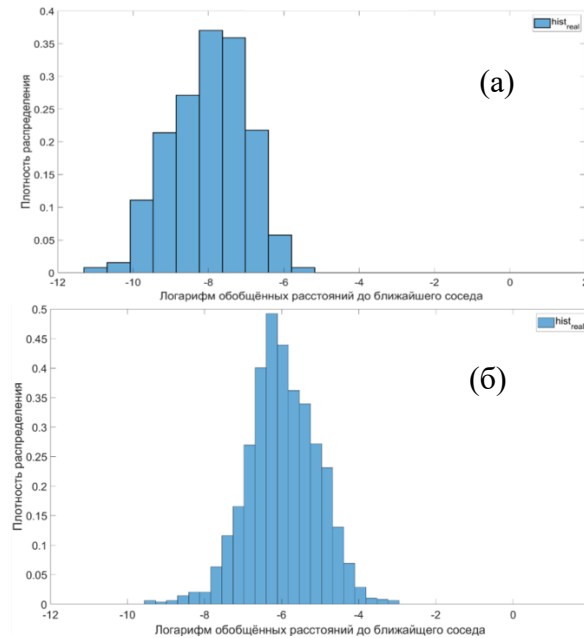


Рис. 4. (а) распределение обобщённых расстояний до ближайшего соседа для первой стадии (предположительно движение магмы по трещинам); (б) распределение обобщённых расстояний до ближайшего соседа для второй стадии (период извержения, истечение лавы на поверхность)

Таким образом, в результате показано, что часто наблюдаемая аномалия  $b$ -value перед извержениями, возможно, приурочена к вулcano-тектоническим событиям, сопровождающим раскрытие трещин и каналов под давлением магмы. Кластеризация землетрясений для вулканической сейсмичности, видимо, отличается от известной закономерности тектонической сейсмичности, однако причины этого явления требуют дальнейшего исследования.

Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда № 20-17-00180П.

### Литература

- Baiesi M., Paczuski M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // Physical Review E. 2004. V. 69. Article 066106. DOI:[10.1103/PhysRevE.69.066106](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.066106)
- Chiba K., Shimizu H. Spatial and temporal distributions of  $b$ -value in and around Shinmoe-dake, Kirishima volcano, Japan // Earth, Planets and Space. 2018. V. 70. Article 122. DOI:[10.1186/s40623-018-0892-7](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0892-7)
- Larsen G., Guðmundsson M.T. (Institute of Earth Sciences - Nordvulk, University of Iceland) <https://icelandicvolcanos.is/?volcano=BAR> (Last access: 15 November 2019).
- Jacobs K.M., McNutt S.R. Using seismic  $b$ -values to interpret seismicity rates and physical processes during the preruptive earthquake swarm at Augustine Volcano 2005–2006 // Alaska: U.S. Geological Survey Professional Paper. 2010. Article 1769. P. 59–83.

- Novelo-Casanova D.A., Martínez-Bringas A., Valdés-González C.* Temporal variations of Qc-1 and b-values associated to the December 2000-January 2001 volcanic activity at the Popocatepetl volcano, Mexico // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2006. V. 152. P. 347–358. DOI:[10.1016/J.JVOLGEORES.2005.10.003](https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2005.10.003)
- Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V.* Earthquake productivity law // *Geophysical Journal International*. 2020. V. 222. No 2. P. 1264–1269. DOI:[10.1093/gji/ggaa252](https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252)
- Zaliapin I., Gabrielov A., Keilis-Borok V.I., Wong H.* Clustering analysis of seismicity and aftershock identification // *Physical review letters*. 2008. V. 101. Article 018501. DOI:[10.1103/PhysRevLett.101.018501](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.018501)

## THE ERUPTION OF THE ICELANDIC VOLCANO BÁRDARBUNGA IN 2015 FROM THE POINT OF VIEW OF THE SEISMICITY REGIME

Grekov E.M.

*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

*E-mail: [grekov.em16@physics.msu.ru](mailto:grekov.em16@physics.msu.ru)*

УДК 550.34

## ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ГРУНТОВЫХ СЛОЕВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ МОНГОЛО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА

Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П.

*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*

*E-mail: [dzhurik@crust.irk.ru](mailto:dzhurik@crust.irk.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** Для территорий южной части Восточной Сибири и северной Монголии дана количественная оценка влияния скоростных неоднородностей грунтовых слоев верхней части земной коры на единый обоснованный исходный сигнал. Сами особенности влияния представлены в параметрах основных показателей проявления сейсмичности по расчетным акселерограммам, спектрам и частотным характеристикам.

**Ключевые слова:** Монголо-Сибирский регион, сейсмические воздействия, акселерограммы, спектры, максимальные ускорения

Выполненные исследования направлены на развитие методов изучения и прогноза сейсмических воздействий сильных землетрясений Монголо-Сибирского региона. Конкретной задачей является оценка влияния скоростных неоднородностей приповерхностных рыхлых отложений и глубинных слоев коренных «эталонных» грунтов, представленных сейсмогрунтовыми моделями, на прогнозируемые сейсмические воздействия сильных землетрясений региона.

Для реализации поставленных задач сформирован исходный сигнал, построены сейсмогрунтовые модели и проведены теоретические расчеты. Для формирования исходного сигнала нами предложен подход, основанный на использовании относительно сильных землетрясений. Такая возможность связана с произошедшими в последние годы (2020–2022) относительно сильными землетрясениями, зарегистрированными на грунтах I категории постоянными сейсмическими станциями юга Сибири и северной Монголии. В результате для основных зон ВОЗ были отобраны 5 записей сильных землетрясений. Их основные параметры ограничены магнитудой  $M > 5$ , энергетическим классом  $K > 14$ , интенсивностью в эпицентре ( $I$ ) от 7 до 8.7 баллов и эпицентральной дистанцией  $\Delta$  от 80 до 600 км [Джурик и др., 2022].

Отобранные землетрясения характеризуются длительностью колебаний до 20 с (Иркутск), до 80 с (Улаанбаатар) и основными максимумами спектров на частотах 1.61–2.25 Гц (Иркутск) и 0.83–1.62 Гц (Улаанбаатар). Представленные спектры нормировались, и рассчитывался средний амплитудный спектр по 5 землетрясениям. Фазовый спектр находился по данным записи землетрясения в г. Иркутске с помощью прямого преобразования Фурье. Следующим этапом является Фурье-синтез расчетного среднего

амплитудного спектра сильных землетрясений с фазовым спектром, полученным по местному землетрясению [Джурик и др., 2015]. Расчетная нормированная акселерограмма (рис. 1, А) масштабировалась по значениям максимальных амплитуд (рис. 1, Б), это не противоречит нормативным документам [Методическое руководство..., 1988]. Для горизонтальной компоненты она отвечает параметрам очагов как близких, так и относительно далеких сильных землетрясений. Максимумы спектров приходятся на интервал частот от 1 до 5 Гц (рис. 1, В) и по интенсивности колебаний поверхности соответствуют уровню сейсмичности для «эталонных» коренных пород, равному 7 баллам.

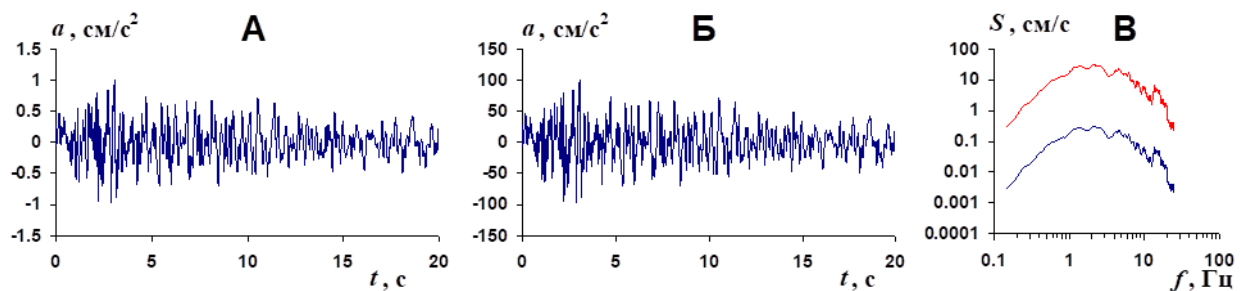


Рис. 1. Сформированный исходный сигнал для «эталонных» коренных пород. А – нормированная акселерограмма; Б – масштабированная акселерограмма на 8-балльные сотрясения для «эталонных» коренных пород; В – спектр нормированной акселерограммы (синий) и масштабированной (красный)

В первом приближении построено 5 сейсмогрунтовых моделей, для их построения использовались данные бурения, результаты сейсморазведочных и сейсмометрических измерений, выполненные ранее [Джурик и др., 2009]. Учитывались и полученные в последнее время обобщенные данные о скоростях сейсмических волн для наиболее распространенных типов грунтов исследуемой территории. Первая модель соответствует (сверху до 30 м) «эталонным» коренным породам (рис. 2, 1А). Ниже по разрезу распределение скоростей продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн до возможных глубин возникновения землетрясений (14 км) взяты из работы [Зорин и др., 1994; Недра Байкала..., 1981] и до глубин 2–4 км по данным, приведенным в работе [Джурик и др., 2009].

Для построенных моделей юго-западной части Монголо-Сибирского региона отмечаются широкие пределы изменения отмеченных параметров. В сильнотрещиноватых скальных породах диапазон изменения  $V_p$  составляет 1800–2300 м/с, наиболее вероятное их значение в этом состоянии равно 2000 м/с. В слаботрещиноватых коренных породах при их залегании ниже 10 и более метров пределы изменения скоростей от 2800 до 4000 м/с. Ниже 3–4 км и до 14 км скорости сейсмических волн увеличиваются от 4–5 до 6.8 км/с. Скорости поперечных волн при этом, по построенным моделям, возрастают от 1.1 до 3.9 км/с (рис. 2, 1А).

Для анализа влияния приповерхностных неоднородностей на сформированный исходный сигнал первая модель была дополнена рыхлыми отложениями мощностью 10, 30, 90 и 210 м для моделей 2–5 соответственно (рис. 2, А). Скорости  $V_p$  в рыхлых неводонасыщенных породах меняются от аномально низких 500–600 м/с в верхнем слое (до 10 м) до 700–900 м/с и более – в нижележащих слоях. По сейсмическим свойствам это «средние грунты» II категории, к которым относится исходная сейсмичность по картам общего сейсмического районирования [ОСР-2015].

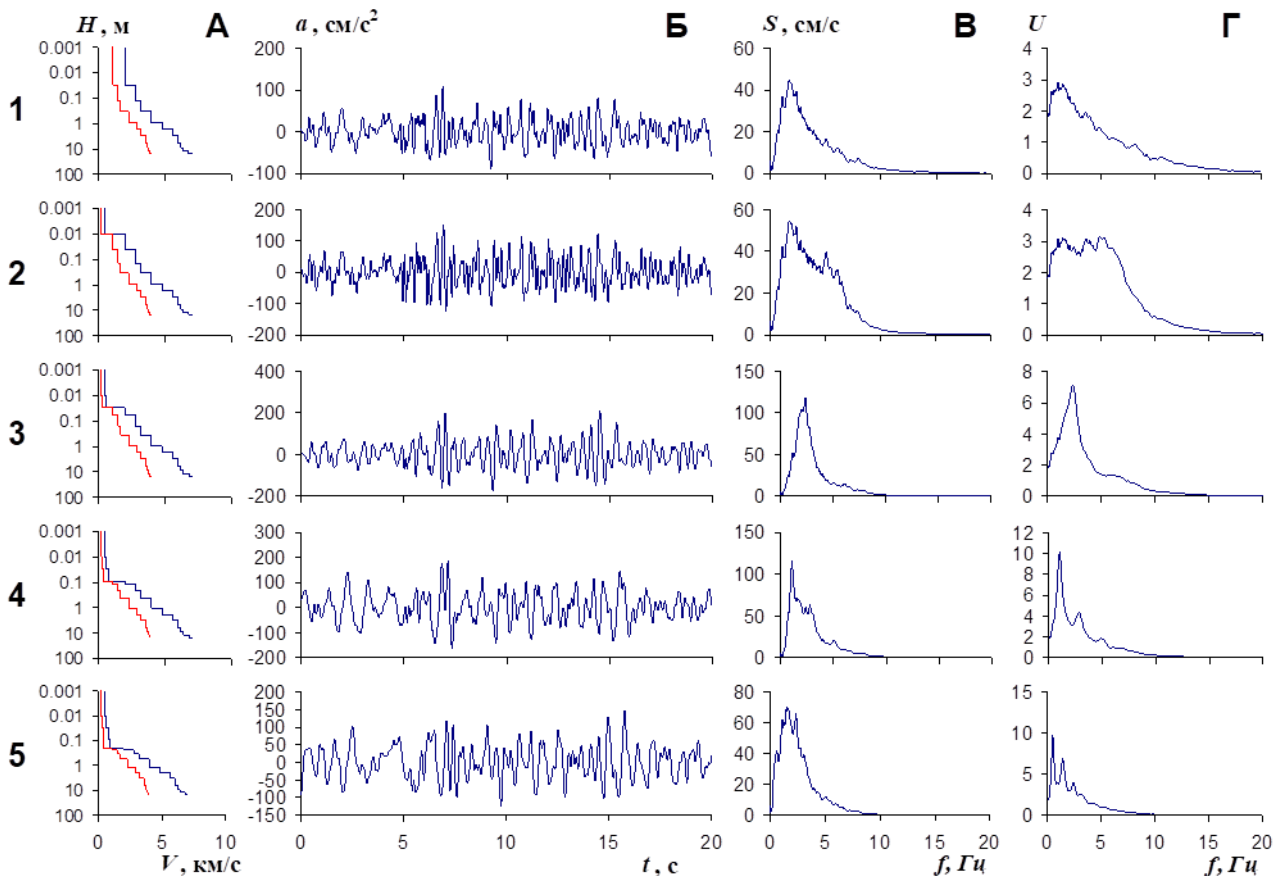


Рис. 2. Расчетные показатели проявления сейсмичности для построенных сейсмогрунтовых моделей: А – изменение скоростей сейсмических волн ( $P$  – красная и  $S$  – черная линии) с глубиной для построенных моделей 1–5; Б – акселерограммы; В – спектры; Г – частотные характеристики

Теоретические расчеты основывались на использовании методики и программы расчетов колебаний на поверхности и во внутренних точках среды [Методическое руководство..., 1988; Ратникова, 1973]. Необходимо отметить, что при расчетах сформированный исходный сигнал на 8-балльные сейсмические воздействия, для средних грунтов, использовался только для выявления сравнительной оценки его изменения для построенных моделей. При этом предполагалось, что вся энергия исходного сигнала уходит на упругое деформирование вышележащих слоев коренных и рыхлых пород.

Результаты расчетов показывают (табл. 1), что для модели коренных «эталонных» пород максимальное ускорение равно  $110 \text{ см/с}^2$ , преобладающая частота спектра, соответствующая максимальному их уровню ( $44.6 \text{ см/с}$ ), равна  $2.15 \text{ Гц}$ . Эти показатели свидетельствуют о преобладании низкочастотных колебаний коренных пород, представленных моделью № 1, что подтверждается частотой основного максимума частотной характеристики близкой к  $1 \text{ Гц}$ .

Дополненные рыхлыми грунтами модели следующим образом влияют на изменение основных параметров исходного сигнала. Максимальные ускорения при изменении мощности рыхлых отложений от  $10$  до  $210 \text{ м}$  увеличились и находятся в пределах  $146\text{--}207 \text{ см/с}^2$ . Но определенная зависимость от мощности рыхлых грунтов по представленным данным начинает сказываться с  $30 \text{ м}$ , при этом  $A_{\max}$  снижается с  $207$  до  $146 \text{ см/с}^2$ . Такая же закономерность отмечается и для максимальных значений спектра. Это связано с затуханием сейсмических волн. Частота основного максимума спектра меняется незначительно, от  $1.51$  до  $2.34 \text{ Гц}$ .

Таблица 1. Основные параметры расчетных акселерограмм

№ модели (h-рыхлых грунтов) (м)	Максимальное ускорение $A_{\max}$ , ( $\text{см/с}^2$ )	Максимальное значение спектра $S_{\max}$ , ( $\text{см/с}$ )	Частота основного максимума спектра, ( $\text{Гц}$ )	Максимальный уровень частотной кривой ( $U$ )	Частота основного максимума частотной кривой ( $\text{Гц}$ )
Коренные «эталонные» породы					
1	110	44.6	1.76	2.94	0.98
Рыхлые неводонасыщенные породы					
2 (10)	151	54.4	1.76	3.13	4.83
3 (30)	207	118	2.34	7.12	2.34
4 (90)	186	115	1.07	10.22	1.03
5 (210)	146	70.1	1.51	9.83	0.49

Частотные характеристики в интервале изменения мощностей рыхлых отложений от  $10$  до  $210 \text{ м}$  для построенных моделей (рис. 2, А 2–5) показывают, что резонансная частота закономерно уменьшается с увеличением мощности рыхлых отложений от  $4.83$  до  $0.49 \text{ Гц}$ . В то же время для максимального значения уровня частотной характеристики такой закономерности в зависимости от общей мощности слоя не наблюдается.

Непосредственная оценка различия влияния слоев рыхлых неводонасыщенных грунтов для построенных сейсмогрунтовых моделей представлена, для наглядности, на рис. 3 в виде частотно зависимых функций  $U(f)$ . Они получены согласно выражению:

$$U(f) = U_i(f) / U_1(f),$$



где  $U_i(f)$  – экспериментальные частотные характеристики для моделей 2–5 и  $U_1(f)$  – расчетная частотная характеристика для модели эталонных коренных пород № 1 (рис. 1, А).

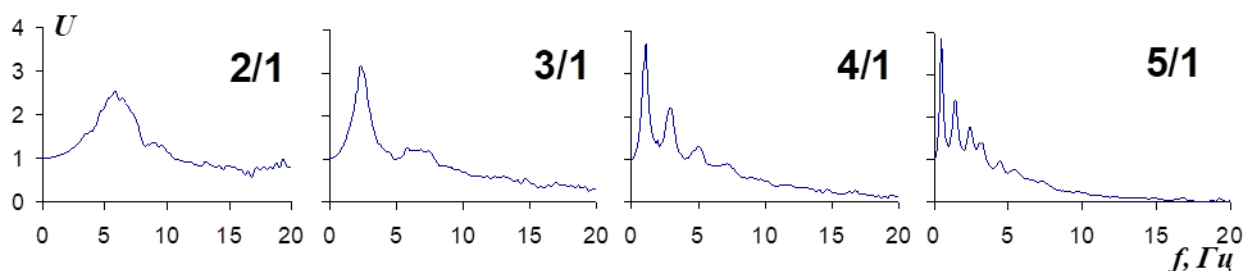


Рис. 3. Выявление влияния слоев рыхлых неводонасыщенных грунтов для сейсмогрунтовых моделей по отношениям частотных характеристик

Частоты основных максимумов относительных частотных характеристик несколько увеличились, но не более чем на 1 Гц, и это различие уменьшается с увеличением общей мощности рыхлых слоев. Основные максимумы относительных характеристик также сдвигаются в сторону низких частот и меняются от 2.56 до 3.86, но их вклад от общего воздействия значительный. По отношению к максимумам частотных характеристик для построенных моделей, которые меняются от 3.13 до 10.22 (см. таблицу), он может быть меньше в 1.2–3.3 раза.

Таким образом, особенности влияния скоростных неоднородностей грунтовых слоев для построенных моделей представлены нами в параметрах основных показателей проявления сейсмичности по расчетным акселерограммам, спектрам, частотным характеристикам и их параметрам. И могут быть использованы при оценке сейсмических воздействий, в особенности для прогнозируемых близких сильных землетрясений, для промышленных районов юга Сибири и северной Монголии.

*Исследование выполнено при поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-55-44011.*

### Литература

- Джурик В.И., Брыжак Е.В., Батсайхан Ц., Серебренников С.П., Шагун А.Н., Ескин А.Ю. Спектральный анализ сильных землетрясений Байкало-Монгольского региона, зарегистрированных в Иркутске и Улаанбаатаре в 2020–2021 гг. // Вулканология и сейсмология. 2022. № 5. С. 72–84. DOI: [10.31857/S0203030622050042](https://doi.org/10.31857/S0203030622050042)
- Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Серебренников С.П., Брыжак Е.В. Изучение динамических характеристик землетрясений Байкальской рифтовой зоны с целью формирования исходных сейсмических сигналов // Вулканология и сейсмология. 2015. № 5. С. 1–11. DOI: [10.7868/S020303061505003X](https://doi.org/10.7868/S020303061505003X)
- Джурик В.И., Ключевский А.В., Серебренников С.П., Демьянович В.М., Батсайхан Ц., Баяраа Г. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. Иркутск: Сибирское отделение РАН, Институт земной коры, 2009. 420 с. ISBN 978-5-902764-47-3

Зорин Ю.А., Беличенко В.Г., Турутанов Е.Х. Байкало-Монгольский трансект // Геотектоника. 1994. № 1. С. 94–109.

Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М.: Наука, 1988. 223 с.

Недра Байкала по сейсмическим данным / С.В. Крылов, М.М. Мандельбаум, Б.П. Мишенькин и др. Новосибирск: Наука, 1981. 105 с.

ОСР-2015. Свод правил СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. 2014. 60 с.

Ратникова Л.И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. М.: Мир, 1973. 124 с.

**IDENTIFICATION OF THE FEATURES OF THE INFLUENCE OF VELOCITY  
INHOMOGENEITIES OF SOIL LAYERS ON THE SEISMIC EFFECTS  
OF LARGE EARTHQUAKES IN THE MONGOL-SIBERIAN REGION**

Dzhurik V.I., Bryzhak E.V., Serebrennikov S.P.

*Institute of Earth's crust, SB, RAS, Irkutsk, Russia*

*E-mail: [dzhurik@crust.irk.ru](mailto:dzhurik@crust.irk.ru)*

УДК 550.34

## О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ В ГЕОФИЗИКЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Дмитриенко М.В.<sup>1</sup>, Кислов К.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «СЕКБЮТЕЛ», г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия

E-mail: [mdmitrienko@sequitel.ru](mailto:mdmitrienko@sequitel.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** Современные системы мониторинга протяженных объектов основаны на методах бесконтактного обнаружения. Распределенное акустическое зондирование (DAS) – сенсорная технология, которая быстро развивалась в последние годы. Благодаря своим уникальным преимуществам в мониторинге, высокой плотности каналов, работе в режиме реального времени, DAS перспективно во многих областях, таких как разведка нефти и газа, сейсмические наблюдения и подземная съемка. В области мониторинга протяженных объектов DAS уже применяется по широкому спектру характеристик на протяжении ряда лет. Принципиально эти системы ничем не отличаются от используемых в геофизике. Они представляют собой расположенный вдоль протяженного объекта оптоволоконный кабель и подключенный к его концу оптический регистрирующий блок. Во многих случаях кабель не крепится непосредственно к конструкциям объекта, а закапывается на небольшом расстоянии от него. Мы предлагаем обсудить возможность использования получаемых данных для параллельного решения геофизических задач. Данные можно использовать в геофизике без подключения какого-либо дополнительного оборудования.

**Ключевые слова:** мониторинг протяженных объектов, распределенное акустическое зондирование, Distributed Acoustic Sensing, DAS, применение в геофизике

Под протяженными объектами (ПО) понимаются инженерно-строительные объекты и устройства, предназначенные для транспортирования жидкостей, газов, иных объектов, передачи энергии, сигнала. То есть имеются в виду автомобильные и железные дороги, линии связи и электропередачи, нефте-, газо- и иные трубопроводы, инженерно-технические сети. К ним можно также отнести длинные мосты и дамбы, государственную границу, периметры охраняемых объектов [Кислов, Гравиров, 2015а].

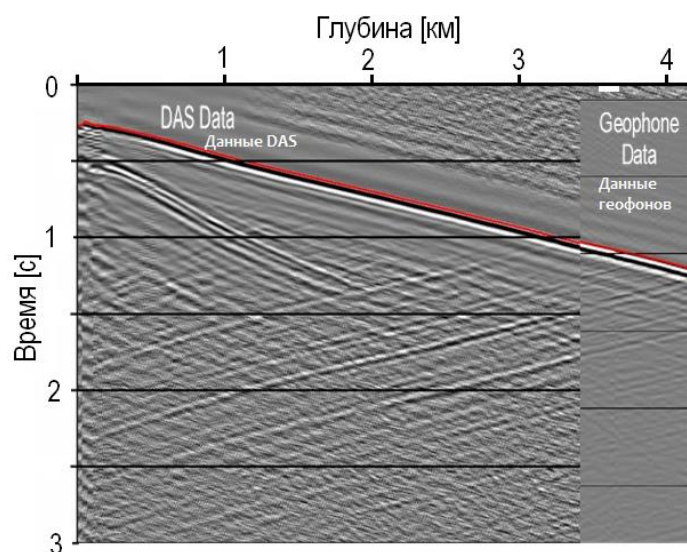
Распределенное акустическое зондирование (DAS) – прекрасно зарекомендовавшее себя решение для мониторинга ПО, т. к. может измерять динамические деформации (например, вибрации и звуковые волны) вдоль волоконных кабелей на больших расстояниях, полностью распределено и в режиме реального времени [Psel, Turbin, 2012].

Оптическое волокно – надежный и дешевый сенсор физических полей, в том числе механических и температурных – невосприимчиво к электромагнитным помехам природного и техногенного характера и лучшая среда для передачи информации на расстояния в сотни километров. Эти волокна – основа стандартных волоконно-оптических кабелей, которые широко применяются всеми без исключения операторами связи по всему миру. Это не только сенсор воздействий, но и одновременно линия связи [Pleshkov et al., 2013]. Во многих

случаях кабель не крепится непосредственно к конструкциям объекта, а закапывается в грунт на удалении от 0.5 до 10 м от него, т. е. фиксирует именно деформацию грунта, а не объекта. Оконечное устройство – оптический регистрирующий блок – обычно располагается в центре реагирования и предназначено для записи колебаний в виртуальных каналах (число которых может достигать до десятков тысяч), обработки сигналов и выдачи информации о состоянии объекта. В процессе мониторинга решаются задачи обнаружения запрещенных активностей, контроля состояния инженерных сооружений и технологических режимов работы оборудования, своевременного обнаружения техногенных и природных катастроф в местах расположения ПО, то есть осуществляется не только обнаружение сигнала, превосходящего шум, но и его классификация.

Известно, что в геофизических приложениях, в которых применяется DAS, широко используются темные волокна коммуникационных оптоволоконных кабелей. В данном случае мы предлагаем полностью укомплектованный комплекс технических средств, включающий волоконно-оптические сенсорные устройства, оконечное устройство и компьютерные методы обработки информации. Возможно, понадобится только дополнительный компьютер для специфической обработки и передачи данных, так как получаемые «сырые» данные представляют собой, как правило, очень большой массив. Их обработка с применением сейсмологических алгоритмов может привести к революционным результатам в геофизике.

Факт: практика применения DAS в вертикально-сейсмическом профилировании показала, что получаемые данные зачастую превосходят по качеству, получаемые с сертифицированных поверенных геофонов. При этом удельная стоимость получения сопоставимого объема информации при не уступающем качестве на порядок ниже (см. рисунок).



В настоящее время DAS используется в России для мониторинга большого количества ПО, причем не только сильно зашумленных (таких как железные дороги), но и относительно тихих, проходящих по ненаселенным местам (трубопроводы, линии энергопередачи и связи) [Zhu et al., 2022]. Можно сказать, что вся страна покрыта сетью DAS.

Есть определенные наработки по интеллектуальной обработке данных. Среди них снижение шума (помехи, вызванные человеком, ветром, механическим перенапряжением и изменениями температуры) и классификация сигналов [Mekhtiev et al., 2022].

Основные проблемы:

- 1) сама возможность получения данных с существующих систем (как правило, эти данные конфиденциальны, и операторы не спешат делиться ими, не имея на это мотивации);
- 2) синхронизация данных по времени;
- 3) техническая возможность передачи огромного массива данных в режиме реального времени;
- 4) верификация обработанных данных с данными, полученными с существующих систем геофизических данных;
- 5) недостаточное понимание и внимание (и недоверие) со стороны научного сообщества.

Как представляется, использование в геофизике существующих систем мониторинга протяженных объектов позволит существенно расширить систему сейсмометрических наблюдений, что приведет к снижению магнитудного порога наблюдаемых событий и расширению каталогов, даст возможность исследовать геологические структуры вдоль линий мониторинга, следить за деградацией вечной мерзлоты [Lindner et al., 2023]. Возможно, такие сейсмометрические наблюдения положат основу для развития в России систем раннего предупреждения о землетрясении [Кислов, Гравиров, 2015б; Lior et al., 2023].

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.*

### **Литература**

- Кислов К.В., Гравиров В.В. Сейсмическая защита протяженных объектов // Инженерная защита. 2015а. Т. 5 (10). С. 98–105.
- Кислов К.В., Гравиров В.В. Сейсмический мониторинг и раннее предупреждение о землетрясениях для протяженных объектов // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Круглый стол. 2015. Сборник докладов. М.: ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, 2015б. С. 164–173.

- Lindner F., Smolinski K., Scandroglio R., Fichtner A., Wassermann J.* Seismic Monitoring of Permafrost Dynamics at Mt. Zugspitze (German/Austrian Alps) // EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria. EGU23-12107. DOI:[10.5194/egusphere-egu23-12107](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-12107)
- Lior I., Rivet D., Ampuero J.-P., Sladen A., Barrientos S., Sánchez-Olavarria R., Villarroel Opazo G.A., Bustamante Prado J.A.* Magnitude Estimation and Ground Motion Prediction to Harness Fiber Optic Distributed Acoustic Sensing for Earthquake Early Warning // EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria. EGU23-13803. DOI:[10.5194/egusphere-egu23-13803](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-13803)
- Mekhtiev A., Alkina A., Neftissov A., Kazambayev I., Kirichenko L.* Overview of Intelligent Systems for Monitoring the Integrity of Technical Objects Based on Distributed Fiber-optic Sensors // Information Technology and Implementation. 2022. P. 290–306. [https://ceur-ws.org/Vol-3347/Paper\\_25.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-3347/Paper_25.pdf)
- Pleshkov D., Akhmedov E., Psel N., Turbin A.* OMEGA-LDACS: Safer Detection with the Distributed Acoustic Sensor. 3R // Technical Journal for Piping System Integrity and Efficiency. Pipeline Special 2013. Vulkan-Verlag GmbH, Essen, Germany. P. 43–46.
- Psel N., Turbin A.* Innovative Response to Technologic and Anthropogenic Challenges: Omega's Fibre-Optic Cable-Based Monitoring System for Pipelines // Pipelines International Digest. 2012. V. 11. P. 18–19.
- Zhu H.-H., Liu W., Wang T., Su J.-W., Shi B.* Distributed Acoustic Sensing for Monitoring Linear Infrastructures: Current Status and Trends // Sensors. 2022. V. 22(19). 7550. DOI:[10.3390/s22197550](https://doi.org/10.3390/s22197550)

## MONITORING SYSTEMS OF EXTENDED OBJECTS AND THE PROSPECTS FOR THEIR APPLICATION IN GEOPHYSICS

Dmitrienko M.V.<sup>1</sup>, Kislov K.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SEQUTEL LLC, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia

E-mail: [mdmitrienko@sequtel.ru](mailto:mdmitrienko@sequtel.ru)

УДК 550.8.052. 550.831.23. 550.812.14

## АНАЛИЗ ЕСТЕСТВЕННЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ КВАРЦЕВОГО ГРАВИМЕТРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ГЕОЛОГИИ

Ерохин А.М.<sup>1</sup>, Венедиктов К.В.<sup>1</sup>, Лобанов А.М.<sup>2</sup>, Белов А.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Петровайзер», г. Тверь, Россия

<sup>2</sup> Российский государственный геологоразведочный университет  
имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия

E-mail: [econg3@yandex.ru](mailto:econg3@yandex.ru), [erokhin\\_am@petroviser.ru](mailto:erokhin_am@petroviser.ru)

(стендовый доклад)

**Аннотация.** Коллективом геофизиков МГРИ гравиметр ГНУ-КВ был адаптирован для работы в режиме портативной сейсмологической станции для регистрации естественных сейсмических колебаний в диапазоне частот 0.05–0.5 Гц. В ходе исследования с целью определения амплитуды колебания грунтов в микрометрах и ускорения в  $(\text{см}/\text{с}^2) \times 10^{-3}$  (в мГал) был определен переводной коэффициент между результатами оцифрованного сигнала колебаний индикатора – маятника ГНУ-КВ и инерционными ускорениями в мГал. Проведенные исследования подтверждают возможности прибора ГНУ-КВ для количественной оценки физических параметров колебаний грунтов.

**Ключевые слова:** гравиметр ГНУ-КВ, амплитудно-частотная характеристика колебаний грунтов, техногенный микросейсмический фон, сейсмограф СМ-3КВ

Земля подвержена постоянным колебаниям из-за различных природных и техногенных причин. Одним из самых значимых типов колебаний являются гравитационные инерциальные колебания, которые означают периодические колебания земной коры и окружающей среды в ответ на воздействие внутренних и внешних сил притяжения. Эти колебания могут быть вызваны различными явлениями, такими как сейсмические активности, движения земной коры, вулканическая активность и другие геологические процессы [Лобанов и др., 2012; Лобанов, Романов, 2015].

Особенно растет интерес к изучению и анализу длинноволновых составляющих потенциальных полей и, в частности, изучению временных вариаций поля силы тяжести, поскольку они обеспечивают данные о кинематике и динамике Земли [Торге, 1999].

Изучение гравитационных инерциальных колебаний позволяет более глубоко понять динамику и поведение земной коры, а также прогнозировать возможные опасности, связанные с природными катастрофами, такими как землетрясения и вулканические извержения. Источники вибрации в городских и промышленных зонах обычно связаны с антропогенной деятельностью, в то время как эксплуатируемые природные объекты также способны порождать колебания земной коры. Эти данные могут быть полезными для различных прикладных задач, включая строительство, инженерные и экологические

исследования. Поэтому изучение гравитационных инерциальных колебаний имеет большое значение для геологии и других научных дисциплин.

Для классификации микросейсмических колебаний применяется разделение на высокочастотные (30–100 Гц), среднечастотные (10–30 Гц) и низкочастотные (3–10 Гц) колебания. Важность изучения низкочастотных колебаний грунтов подтверждается тем, что они могут иметь большие амплитуды и распространяться на значительные расстояния. Низкочастотные колебания с частотой менее 1 Гц практически не изучены, хотя они имеют большие амплитуды и распространяются на большие расстояния. Эти колебания генерируются крупными природными и промышленными объектами, включая тектонические структуры и залежи углеводородов. В связи с этим была разработана новая методика исследования низкочастотных колебаний грунтов с помощью гравиметра ГНУ-КВ. Этот прибор обладает высокой чувствительностью к низким частотам, которые не фиксируются обычными сейсмическими станциями мониторинга. Адаптация гравиметра ГНУ-КВ позволила получить сейсмологическую станцию, которая проста в использовании, недорога в стоимости и обеспечивает регистрацию малейших изменений гравитационного поля.

Изучение низкочастотных колебаний грунтов проводилось с применением нескольких методов, включая видеозапись колебаний индикатора прибора ГНУ-КВ, оцифровку колебаний индикатора с помощью алгоритма распознавания видео, нормализацию сигнала, фильтрацию шума и приведение к единой шкале. Спектральный анализ временного ряда колебаний проводился с помощью прикладного программного обеспечения «Матлаб» (рис. 1). В результате исследования был выявлен общий характер спектра, который характеризуется наличием 1–2 доминантных частот (рис. 2). Исследования мы провели в районе Российского университета дружбы народов (РУДН) и около Московского геологоразведочного института (МГРИ) [Белов и др., 2023].

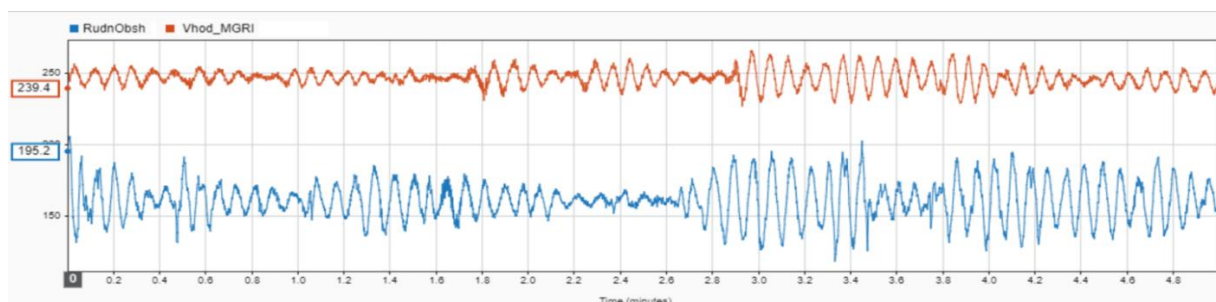


Рис. 1. График временного представления замеров в пунктах



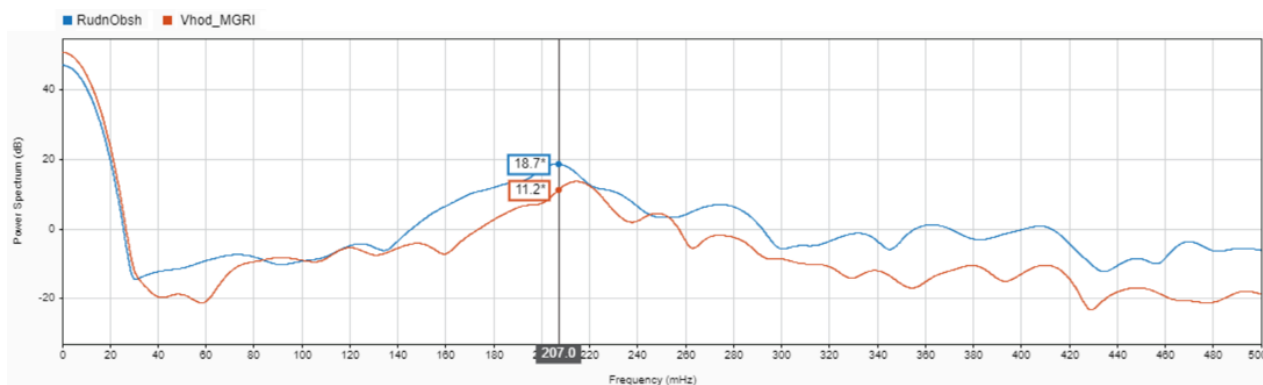


Рис. 2. Частотное представление замеров на пунктах «РУДН» и «МГРИ»

Результаты полевых исследований, проведенных у корпуса МГРИ (рис. 3 (1)) и в районе метро «Войковская» (рис. 3 (2)), показали сходство спектров колебаний индикатора прибора ГНУ-КВ на различных участках, что может говорить о схожих плотностных характеристиках горных пород.

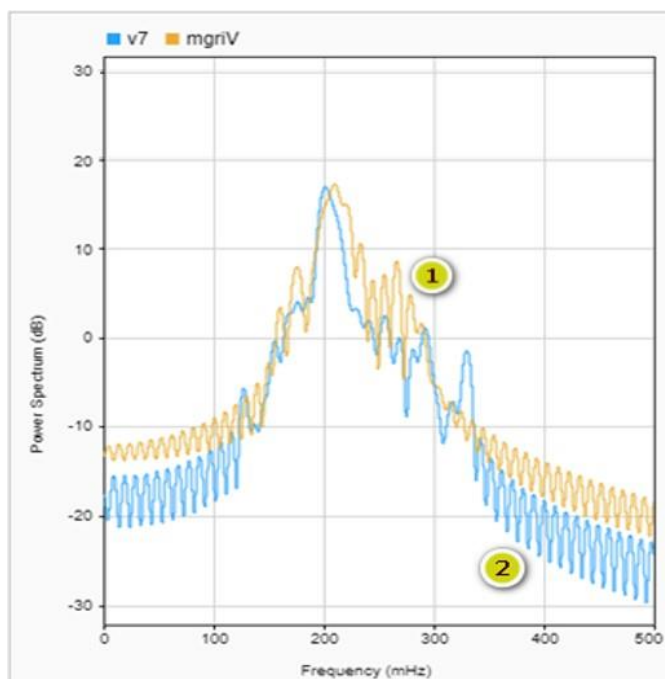


Рис. 3. Спектр колебаний индикатора прибора ГНУ-КВ у корпуса МГРИ (1) и в районе м. «Войковская» (2)

А результаты замеров спектра в районе корпуса МГРИ (рис. 4 (1)) и д. Кудиново (рис. 4 (3)) показывают различные частоты. Разница в спектрах может быть обусловлена различными плотностными характеристиками горных пород, которые влияют на гравитационный эффект в районах измерений. Подтверждение гипотезы и обнаружение связи между различиями в плотности/геологической структуре и спектром колебаний индикатора позволит разработать методику определения мест разлома на границе нарушения стационарности спектра.

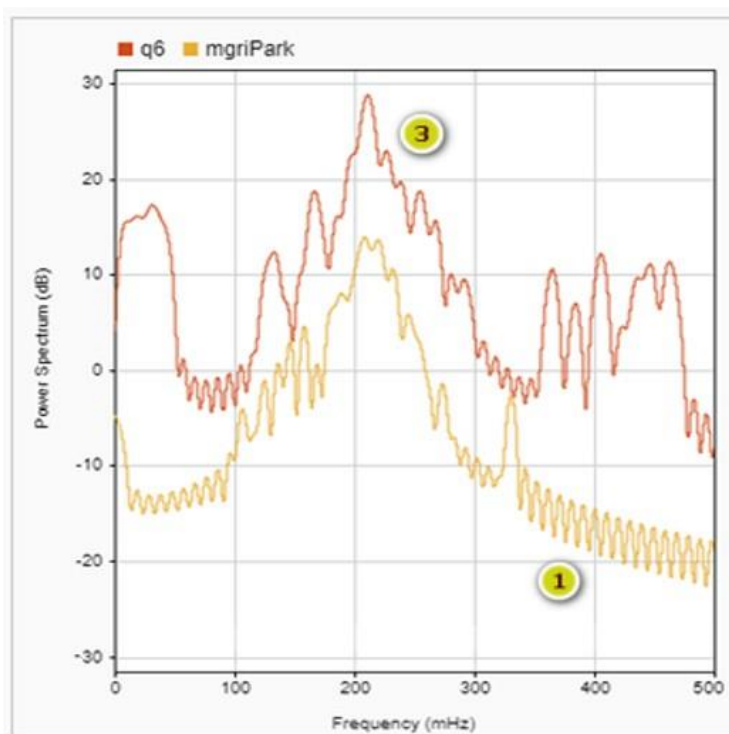


Рис. 4. Графики замеров в районе корпуса МГРИ (1) и д. Кудиново (3)

Исследования низкочастотных колебаний грунтов имеют широкий спектр применений, включая непрерывный мониторинг и изучение процессов подготовки механизмов землетрясений, подготовки процессов извержений вулканов, районирование и изучение динамически нестабильных природных объектов, а также их применение в инженерной, проектной и экологической деятельности. Подход, основанный на использовании гравиметра ГНУ-КВ, обладает рядом преимуществ, включая низкую стоимость, простоту обработки данных и высокую информативность, что позволяет сократить время полевых исследований спектральных характеристик колебаний грунтов [Бережной и др., 2008].

Этот этап является началом нашего пути, и в настоящее время мы работаем над созданием эквивалентного прибора с использованием современных компонентов и вычислительных возможностей.

### Литература

- Белов А.П., Лобанов А.М., Ерохин А.М. Опыт амплитудно-частотной оценки колебания грунтов в диапазоне 0.05–0.5 Гц с использованием чувствительного элемента гравиметра ГНУ-КВ // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023. № 65(2). С. 67–73.
- Бережной Д.В., Бирляцев Е.В., Бирляцева Т.Е., Кипоть В.Л., Рыжов В.А., Тумаков Д.Н., Хромченков М.Г. Анализ спектральных характеристик микросейсм как метод изучения структуры геологической среды. Казань: КГУ, 2008. С. 360–386.
- Лобанов А.М., Каххоров У.Х., Гарбацевич В.А. Опыт регистрации инфранизкочастотных гравиинерциальных колебаний. Троицк: ИЗМИРАН, 2012.

Лобанов А.М., Романов В.В. Перспективы гравиметрии при изучении динамически нестабильных природных объектов // Разведка и охрана недр. 2015. № 7. С. 42–46.

Торге В. Гравиметрия / Под ред. А.П. Юзефовича. М.: Мир, 1999.

**ANALYSIS OF NATURAL LOW-FREQUENCY OF GROUND VIBRATIONS  
USING A QUARTZ GRAVIMETER FOR SOLVING  
APPLIED PROBLEMS OF GEOLOGY**

Erokhin A.M.<sup>1</sup>, Venediktov K.V.<sup>1</sup>, Lobanov A.M.<sup>2</sup>, Belov A.P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Petroviser, LLC, Tver, Russia

<sup>2</sup> Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,  
Moscow, Russia

E-mail: [econg3@yandex.ru](mailto:econg3@yandex.ru), [erokhin\\_am@petroviser.ru](mailto:erokhin_am@petroviser.ru)

УДК 517.9+532.5+537.84

## ОБ ОСЛАБЛЕНИИ НЕЛИНЕЙНОСТИ В АДВЕКТИВНЫХ ЧЛЕНАХ У ПРОСТРАНСТВЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ МАГНИТОГИДРОДИНАМИКИ

Желиговский В.А.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

*E-mail: [vlad@mitp.ru](mailto:vlad@mitp.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация:** Элементарные оценки показывают, что в адвективных членах для модифицированных пространственно-периодических решений уравнений магнито-гидродинамики отсутствует половина пространственного градиента.

**Ключевые слова:** уравнения магнитогиродинамики, пространственно-периодические решения, модифицированные решения, ослабление нелинейности

Рассмотрена стандартная система уравнений магнитогиродинамики, состоящая из уравнения Навье–Стокса, включающего силу Лоренца, которое описывает эволюцию течения несжимаемой электропроводной жидкости, и уравнения магнитной индукции, описывающего эволюцию магнитного поля. Поле скорости течения  $\mathbf{V}$  и магнитное поле  $\mathbf{B}$  считаются соленоидальными.

Анализ численных решений, полученных разными авторами с существенным пространственным разрешением (до  $8192^3$  гармоник Фурье), выявил, что они характеризуются так называемым ослаблением (depletion) нелинейности. Изучению этого явления посвящено большое число работ, среди которых отметим [Donzis et al., 2013; Gibbon et al., 2014], где неожиданное поведение последовательности величин  $D_m$ , связанных с масштабированными моментами завихренности  $\boldsymbol{\omega} = \text{rot } \mathbf{V}$ , интерпретировано как проявление ослабления нелинейности. Аналогичное поведение  $D_m^\pm$ , где роль завихренности играют роторы переменных Эльзассера  $\mathbf{V} \pm \mathbf{B}$ , найдено и в численных решениях задач магнитогиродинамики [Gibbon et al., 2016] (см. также [Jeyabalan et al., 2022]). В работе [Pushkarev, Bos, 2014] проведены прямые численные оценки ослабления нелинейности в двумерной затухающей турбулентности.

В гидродинамике ослабление нелинейности может ассоциироваться с бельтрамизацией решений, состоящей в том, что в областях, где располагаются большие градиенты, векторы поля скорости и завихренности выстраиваются в приблизительно параллельную конфигурацию, отчего их векторное произведение в районе вихря оказывается существенно меньше, чем на периферии. Его также может вызвать самоорганизация течения в структуры типа квазиодномерных жгутов в областях повышенной завихренности [Frisch,

1995]. Кроме того, в случайном гауссовом (турбулентном) соленоидальном потоке  $\mathbf{V}$  потенциальная часть поля вектора Лэмба  $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V}$  может быть в несколько раз больше (в смысле нормы в пространстве Лебега  $L_2$ ), чем соленоидальная [Tsinober, 1990]. В решениях задач магнитогидродинамики наблюдается тенденция векторов поля скорости течения и магнитного поля в областях больших градиентов стать параллельными, что приводит к аналогичным последствиям для адвективного члена [Matthaeus et al., 2008; Servidio et al., 2008] в уравнении магнитной индукции.

В работе [Zheligovsky, 2021] показано, что если пространственно-периодические решения уравнений магнитогидродинамики  $(\mathbf{V}, \mathbf{B})$  в начальный момент принадлежат соболевскому пространству  $H_{1/2}(\mathbb{T}^3)$ , то в почти всякий последующий момент времени они оказываются пространственно-аналитическими. Для анализа их поведения [Zheligovsky, 2021] предложил использовать модифицированные решения  $(\mathbf{v}, \mathbf{b})$ , коэффициенты гармоник Фурье которых  $\mathbf{v}_n$  и  $\mathbf{b}_n$  удовлетворяют соотношениям  $\mathbf{V}_n = \mathbf{v}_n \exp(-\Gamma|\mathbf{n}|)$  и  $\mathbf{B}_n = \mathbf{b}_n \exp(-\Gamma|\mathbf{n}|)$ , где  $\Gamma$  не зависит от трехмерного волнового вектора  $\mathbf{n}$ , но может зависеть, например, от норм полей  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{b}$ . В частности, [Zheligovsky, 2021] показал, выбрав  $\Gamma = \delta(1 + \|\mathbf{v}\|_{3/2}^2 + \|\mathbf{b}\|_{3/2}^2)^{-1/2}$ , где  $\delta$  – положительная константа, что для высших норм решений остаются для любого времени ограниченными интегралы, аналогичные рассмотренным для гидродинамической задачи в статье [Foias et al., 1981].

В докладе представлен альтернативный механизм ослабления нелинейности. Все присутствующие в уравнениях магнитогидродинамики адвективные члены с учетом соленоидальности поля скорости и магнитного поля преобразуются в суммы выражений вида  $(\mathbf{C} \cdot \nabla) \mathbf{D}$ . В уравнениях для коэффициентов гармоник  $\mathbf{c}_n$  и  $\mathbf{d}_n$  модифицированных решений, отвечающих волновому вектору  $\mathbf{n}$ , эти выражения преобразуются в суммы по векторному индексу  $\mathbf{k}$  вида  $\sum_{\mathbf{k}} (\mathbf{c}_k \cdot \mathbf{n}) \mathbf{d}_{n-k} \exp(\Gamma(|\mathbf{n}| - |\mathbf{n}-\mathbf{k}| - |\mathbf{k}|))$ . В докладе приведены элементарные оценки, из которых следует, что при мажорировании этой суммы множитель  $|\mathbf{n}|$  можно заменить на  $(|\mathbf{n}|^{1/2} + |\mathbf{n}||\mathbf{k}|^{-1/2})\Gamma^{-1/2}$ , т. е., хотя формально градиент присутствует в первой степени, эффективно в оценках половина его отсутствует. Таким образом, показано, что ослабление нелинейности происходит в том числе вследствие уменьшения величины нелинейных членов из-за действия указанного механизма эффективного снижения степени дифференциального оператора. Отметим, что сомножитель  $\Gamma^{-1/2}$  может оказывать противоположное влияние, т.е. приводить к увеличению оценки адвективного члена.

Насколько нам известно, представленный в докладе механизм ослабления нелинейности ранее в литературе не рассматривался. Рассмотрены некоторые результаты его действия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00114,  
<https://rscf.ru/project/22-17-00114/>.

### Литература

- Donzis D.A., Gibbon J.D., Gupta A., Kerr R.M., Pandit R., Vincenzi D. Vorticity moments in four numerical simulations of the 3D Navier–Stokes equations // *Journal of Fluid Mechanics*. 2013. V. 732. P. 316–331. DOI:[10.1017/jfm.2013.409](https://doi.org/10.1017/jfm.2013.409)
- Foias C., Guillopé C., Temam R. New a priori estimates for Navier–Stokes equations in dimension 3 // *Communications in Partial Differential Equations*. 1981. V. 6. P. 329–359. DOI:[10.1080/03605308108820180](https://doi.org/10.1080/03605308108820180)
- Frisch U. *Turbulence: The legacy of A.N. Kolmogorov*. Cambridge University Press, 1995. 296 p.
- Gibbon J.D., Donzis D.A., Gupta A., Kerr R.M., Pandit R., Vincenzi D. Regimes of nonlinear depletion and regularity in the 3D Navier–Stokes equations // *Nonlinearity*. 2014. V. 27. P. 2605–2625. DOI:[10.1088/0951-7715/27/10/2605](https://doi.org/10.1088/0951-7715/27/10/2605)
- Gibbon J.D., Gupta A., Krstulovic G., Pandit R., Politano H., Ponty Y., Pouquet A., Sahoo G., Stawarz J. Depletion of nonlinearity in magnetohydrodynamic turbulence: Insights from analysis and simulations // *Physical Review E*. 2016. V. 93. Article 043104. DOI:[10.1103/PhysRevE.93.043104](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.93.043104)
- Jeyabalan S.R., Chertovskih R., Gama S., Zheligovsky V. Nonlinear large-scale perturbations of steady thermal convective dynamo regimes in a plane layer of electrically conducting fluid rotating about the vertical axis // *Mathematics*. 2022. V. 10. Article 2957. DOI:[10.3390/math10162957](https://doi.org/10.3390/math10162957)
- Matthaeus W.H., Pouquet A., Mininni P.D., Dmitruk P., Breech B. Rapid alignment of velocity and magnetic field in magnetohydrodynamic turbulence // *Physical Review Letters*. 2008. V. 100. Article 085003. DOI:[10.1103/PhysRevLett.100.085003](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.085003)
- Pushkarev A.V., Bos W.J.T. Depletion of nonlinearity in two-dimensional turbulence // *Physics of Fluids*. 2014. V. 26. Article 115102. DOI:[10.1063/1.4901297](https://doi.org/10.1063/1.4901297)
- Servidio S., Matthaeus W.H., Dmitruk P. Depression of nonlinearity in decaying isotropic MHD turbulence // *Physical Review Letters*. 2008. V. 100. Article 095005. DOI:[10.1103/physrevlett.100.095005](https://doi.org/10.1103/physrevlett.100.095005)
- Tsinober A. On one property of Lamb vector in isotropic turbulent flow // *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*. 1990. V. 2. P. 484–486. DOI:[10.1063/1.857747](https://doi.org/10.1063/1.857747)
- Zheligovsky V. Space analyticity and bounds for derivatives of solutions to the evolutionary equations of diffusive magnetohydrodynamics // *Mathematics*. 2021. V. 9. Article 1789. DOI:[10.3390/math9151789](https://doi.org/10.3390/math9151789) [arxiv.org/abs/2108.02746]

## ON DEPLETION OF NONLINEARITY IN ADVECTIVE TERMS FOR SPACE-ANALYTIC SOLUTIONS TO EQUATIONS OF MAGNETOHYDRODYNAMICS

Zheligovsky V.

*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

*E-mail: [vlad@mitp.ru](mailto:vlad@mitp.ru)*

УДК 537.84+517.9+519.63

## ЭВОЛЮЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ БЛОХОВСКОГО ТИПА ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ

Желиговский В.А.<sup>1</sup>, Чертовских Р.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Центр Систем и Технологий, Инженерный факультет Университета  
Порто, Португалия*

*E-mail: [roman@fe.up.pt](mailto:roman@fe.up.pt)*

(устный доклад)

**Аннотация.** Рассматриваются собственные моды блоховского типа в трех линейных задачах устойчивости: задаче кинематического динамо, гидродинамической и магнитогиродинамической (МГД) задачах линейной устойчивости для пространственно-периодических течений и МГД состояний.

**Ключевые слова:** теория динамо, кинематическое динамо, альфа-эффект, вихревая диффузия, вихревая вязкость

Магнитные поля звезд и планет поддерживаются течением (композиционной и/или тепловой конвекцией) проводящей расплавленной среды в их недрах. Конвективное движение проводящей жидкости (например, во внешнем ядре Земли) в присутствии малого магнитного поля индуцирует электродвижущую силу, порождающую электрические токи, чье ассоциированное магнитное поле может усиливать начальное магнитное поле – этот механизм известен как конвективное динамо. Конвективное динамо планет и звезд, в принципе, можно моделировать путем интегрирования уравнений, описывающих тепловые и электромагнитные процессы, однако величины параметров, отвечающие условиям в астрофизических объектах, требуют огромного объема вычислений, которые невозможно выполнить даже на самых современных параллельных компьютерах за разумное время. Кроме того, величины физических параметров, описывающих состояние вещества (например, вязкость, теплопроводность, коэффициент тепловой диффузии) в областях, отвечающих за генерацию, известны неточно, поэтому необходимо изучать зависимости решений от величин этих параметров. Соответственно, для изучения астрофизических динамо необходимо рассматривать упрощенные постановки задачи о генерации магнитного поля.

В начальной фазе эволюции магнитного поля, пока оно мало, естественно рассматривать задачу кинематического динамо, пренебрегая влиянием магнитного поля на течение жидкости (которое осуществляется посредством силы Лоренца). В такой постановке течение считается заданным, и эволюция магнитного поля определяется уравнением магнитной индукции. Если течение стационарно, то эта эволюция в главном определяется

доминирующим собственным значением оператора магнитной индукции: если у него отрицательная действительная часть, то магнитное поле затухает, если же она положительна, то магнитное поле растет экспоненциально во времени (тогда течение является кинематическим динамо при соответствующей величине коэффициента молекулярной магнитной диффузии  $\eta$ ).

Мы рассмотрели задачу кинематического динамо для пространственно-периодического стационарного течения электропроводной жидкости и магнитного возмущения в виде блоховских мод, т. е. произведения поля той же периодичности, что и у течения, и плоской гармонической волны  $e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{x}}$ . При подстановке такого поля в уравнение, определяющее задачу на собственные значения для инкремента роста поля, комплексная экспонента сокращается, а постоянный волновой вектор  $\mathbf{q}$  остается как параметр. Полученная задача имеет существенное вычислительное преимущество: тогда как магнитное поле характеризуется минимум двумя независимыми пространственными масштабами (течения и малые масштабы, заданные  $\mathbf{q}$ ), инкремент его роста может быть вычислен в ячейке периодичности возмущенного состояния без учета в расчете малых масштабов.

Мы вывели выражение для градиента инкремента роста возмущения по  $\mathbf{q}$ , а также доказали, что для центрально-симметричных течений (обладающих свойством  $\mathbf{V}(\mathbf{x}) = -\mathbf{V}(-\mathbf{x})$ ), или когда соответствующее собственное значение оператора магнитной индукции действительно, векторы  $\mathbf{q}$  с целыми или полуцелыми компонентами – стационарные точки инкремента.

В предыдущих работах асимптотическими методами установлено, что большое пространственное разделение масштабов (когда  $|\mathbf{q}|$  мало) приводит к явлениям  $\alpha$ -эффекта или, для центрально-симметричных состояний, вихревой диффузии. В данной работе мы изучали, характеризуются ли доминирующие магнитные моды большим разделением масштабов, т. е. являются ли  $\alpha$ -эффект и вихревая диффузия основными механизмами генерации магнитного поля.

Вычисления доминирующих кинематических мод проводили модификацией метода Арнольди [Zheligovsky, 1993]. Для вычисления действия модифицированного оператора магнитной диффузии был использован псевдоспектральный метод – все производные вычисляли в пространстве Фурье, а произведение поля скорости течения на магнитное поле в физическом пространстве; представление полей в физическом (на равномерной сетке) и пространстве Фурье проводили с помощью прямого и обратного быстрого преобразования Фурье. Для нахождения максимума по  $\mathbf{q}$  использован квазиньютоновский метод BFGS [Press, 1992].



Для вычисления доминирующих кинематических мод мы конструировали искусственные бездивергентные течения с псевдослучайными коэффициентами Фурье, имеющие энергетические спектры трех типов: экспоненциально затухающие, Колмогорова и с наличием малого числа гармоник (т. н. «большие вихри»). Среди течений каждого из этих типов рассматривали как поля общего вида, так и центрально-симметричные. Расчеты доминирующих кинематических мод проводили для коэффициента молекулярной магнитной диффузии  $\eta$  от 0.03 до 0.3. Вычисления показали, что для всех рассмотренных течений блоховские моды имеют максимальный по  $\mathbf{q}$  инкремент роста для волновых векторов  $\mathbf{q}$ , длина которых уменьшается при увеличении  $\eta$ . Разделение масштабов обнаружено только при больших величинах  $\eta$ .

Аналогично мы рассмотрели задачи о линейной устойчивости стационарных пространственно-периодических гидродинамических состояний и МГД состояний к возмущениям вида блоховских мод. Приведенный выше вывод о разделении масштабов в целом справедлив для всех трёх задач устойчивости и для всех трёх типов течений, рассмотренных в этой работе.

Таким образом, показано, что в естественной МГД системе данный диапазон масштабов вызывает возмущения, включающие лишь умеренно более крупные пространственные масштабы (т. е.  $\mathbf{q}$  лишь умеренно малы), а эволюция состоит из каскада процессов, каждый из которых генерирует несколько больший пространственный масштаб; потоки и магнитные поля, характеризующиеся высокой степенью разделения масштабов, не усиливаются. Этот каскад вряд ли поддается линейному описанию. Следовательно, наши результаты подвергают сомнению высокую роль  $\alpha$ -эффекта и вихревой диффузии, основанных на пространственном разделении масштабов, как основных механизмов неустойчивости или генерации магнитного поля в астрофизических системах.

Задача о кинематической генерации магнитных мод блоховского типа для течений с экспоненциальным спектром впервые была рассмотрена в [Желиговский, Чертовских, 2020], результаты настоящей работы представлены в [Chertovskih, Zheligovsky, 2023, в трех частях].

*Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда № 22-17-00114.*

### **Литература**

- Желиговский В.А., Чертовских Р.А. О кинематической генерации магнитных мод блоховского типа // Физика Земли. 2020. № 1. С. 118–132. DOI:[10.31857/S0002333720010159](https://doi.org/10.31857/S0002333720010159)
- Chertovskih R., Zheligovsky V. Linear perturbations of the Bloch type of space-periodic magnetohydrodynamic steady states. I. Mathematical preliminaries // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. V. 23. No 3. P. 1–20. DOI:[10.2205/2023ES000834](https://doi.org/10.2205/2023ES000834)

*Chertovskih R., Zheligovsky V.* Linear perturbations of the Bloch type of space-periodic magnetohydrodynamic steady states. II. Numerical results // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. V. 23. No 4. Article ES4004. DOI:[10.2205/2023es000838](https://doi.org/10.2205/2023es000838)

*Chertovskih R., Zheligovsky V.* Linear perturbations of the Bloch type of space-periodic magnetohydrodynamic steady states. III. Asymptotics of branching // Принято в Russian Journal of Earth Sciences.

*Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P.* Numerical recipes in Fortran. The art of scientific computing. CUP, 2nd ed., 1992.

*Zheligovsky V.A.* Numerical solution of the kinematic dynamo problem for Beltrami flows in a sphere // Journal of Scientific Computing. 1993. V. 8. P. 41–68.

## EVOLUTION OF BLOCH TYPE PERTURBATIONS OF SPACE PERIODIC MAGNETOHYDRODYNAMIC STATES

Zheligovsky V.A.<sup>1</sup>, Chertovskih R.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Research Center for Systems and Technologies, Faculty of Engineering,  
University of Porto, Portugal*

*E-mail: [roman@fe.up.pt](mailto:roman@fe.up.pt)*

УДК 550.34

## О ТРИАДАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Завьялов А.Д.<sup>1</sup>, Зотов О.Д.<sup>1,2</sup>, Гульельми А.В.<sup>1</sup>, Клайн Б.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, пос. Борок,  
Ярославская обл., Россия

E-mail: [zavyalov@ifz.ru](mailto:zavyalov@ifz.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** В докладе вводится понятие триады землетрясений и дается ее определение как своеобразного триединства форшоков, главного удара и афтершоков. Понятие триады позволяет обогатить систематику (т. е. классификацию и номенклатуру) землетрясений. Дана классификация триад. Выделены классическая и зеркальная триады, причем каждая из них может быть как полной, так и укороченной. У полных триад присутствуют все три элемента: форшоки, главный толчок и афтершоки. В укороченных триадах отсутствуют форшоки (укороченная классическая триада) или афтершоки (укороченная зеркальная триада). Кроме того, выделены симметричные триады (число форшоков равно числу афтершоков), среди которых особое место занимают Большие уединенные землетрясения (*Grande terremoto solitario*), у которых форшоки и афтершоки отсутствуют. В работе использовались данные о землетрясениях, произошедших с 1973 по 2019 г. и зарегистрированных в мировом каталоге землетрясений USGS/NEIC.

**Ключевые слова:** триады землетрясений, форшок, афтершок, главный удар, классическая триада, зеркальная триада, закон Бата

В процессе выполнения исследований было введено понятие триады землетрясений. Триада землетрясений представляет собой своеобразное триединство форшоков, главного удара и афтершоков. Понятие триады позволяет обогатить систематику (т. е. классификацию и номенклатуру) землетрясений. Выделены классическая и зеркальная триады, причем каждая из них может быть полной и укороченной.

Использовались данные о землетрясениях, произошедших с 1973 по 2019 г. и зарегистрированных в мировом каталоге землетрясений USGS/NEIC (<https://earthquake.usgs.gov>). Для каждого главного толчка определялась круговая эпицентральная зона с радиусом  $R$ . Если принять, что характерный размер очаговой зоны  $L = 2R$ , то  $L$  определяется по формуле  $\lg L_{(\text{км})} = 0.47M_{\text{ГТТ}} - 1.27$  [Завьялов, Зотов, 2021]. В работе рассматривались землетрясения с глубинами до 250 км. Интервал времени для анализа – 24 часа ДО и 24 часа ПОСЛЕ главного толчка. В качестве основного методического приема применялся метод наложения эпох.

**Классическая триада.** В классической триаде магнитуда главного удара  $M_{\text{ГТТ}}$  всегда превышает максимальную магнитуду форшоков  $M_-$  и афтершоков  $M_+$ , причем  $M_+ > M_-$  и  $N_+ > N_-$ , где  $N_-$  и  $N_+$  – количество форшоков и афтершоков на одинаковых интервалах времени до и после главного удара соответственно. Понятие классической триады было

предложено в работе [Гульельми, 2015]. Пример *полной классической триады* приведен на рис. 1.

**Зеркальная триада.** Пусть максимальная магнитуда форшоков будет больше, чем максимальная магнитуда афтершоков, а форшоки будут более многочисленны, чем афтершоки. В этом случае  $M_+ < M_-$ ,  $N_+ < N_-$ . Распределение событий во времени в *полной зеркальной триаде* представлено на рис. 2.

При отсутствии форшоков в классической триаде такие триады естественно назвать *укороченными классическими триадами*. А при отсутствии афтершоков в зеркальной триаде такие триады следует называть *укороченными зеркальными триадами*.

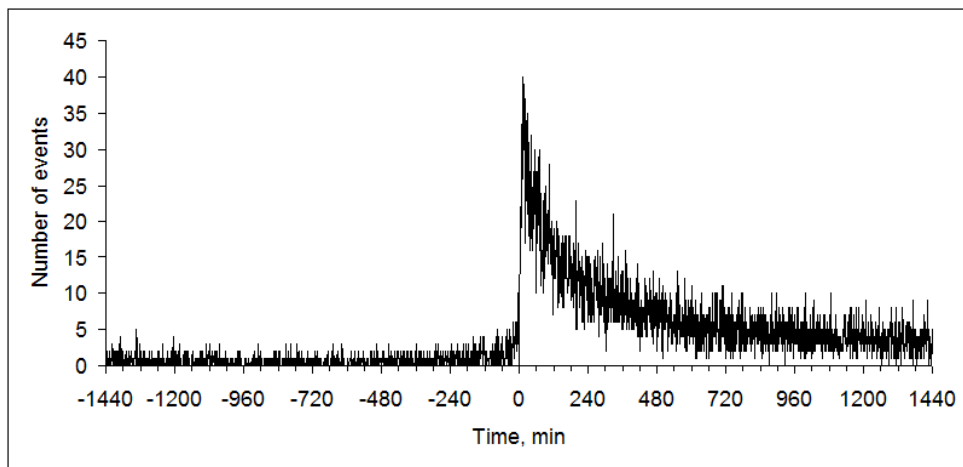


Рис. 1. Распределение событий во времени в классической триаде. График построен методом наложения эпох. Время отсчитывается от момента главного удара

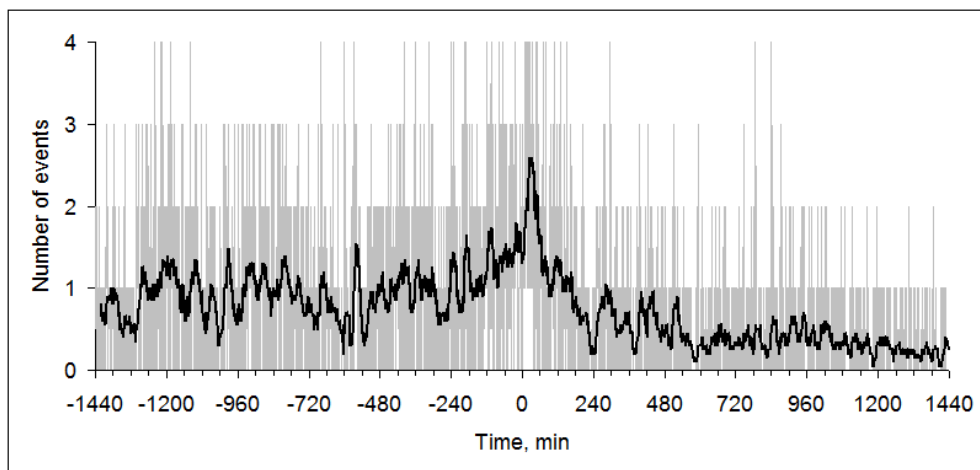


Рис. 2. Распределение событий во времени для зеркальных триад. График построен методом наложения эпох. Время отсчитывается от момента главного удара

**Симметричная триада.** Триады, для которых число форшоков и афтершоков одинаково, т. е.  $N_+ = N_-$ , мы назвали *симметричными* (рис. 3, левая панель). Естественным является вопрос, не существуют ли достаточно сильные землетрясения, не имеющие на заданном интервале времени ни афтершоков, ни форшоков. Пилотный анализ каталога

землетрясений показал, что такие уединенные события действительно происходят. Мы назвали их *Grande terremoto solitario* (итальянский яз.) (*Большое уединенное землетрясение*), или сокращенно GTS. В период с 1973 по 2019 г. обнаружено 2480 GTS (на интервале 24 ч до репера и 24 ч после него землетрясения не наблюдались) (рис. 3, правая панель).

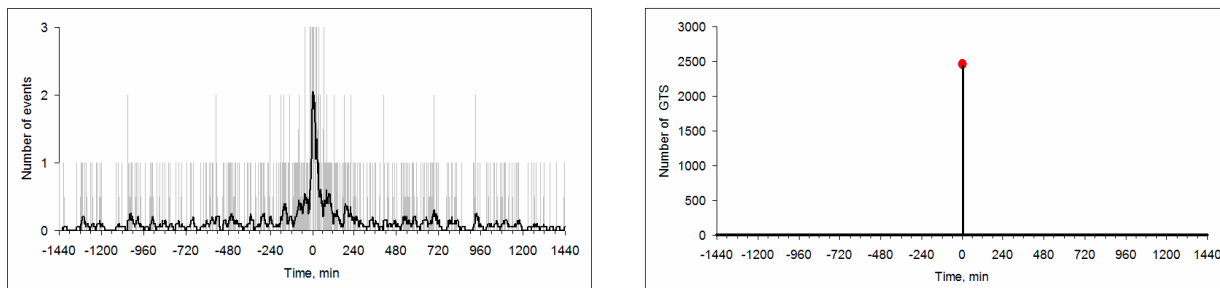


Рис. 3. Слева: распределение сейсмических событий во времени для симметричных триад  $N_- = N_+$ . Справа: уединенное землетрясение (частный случай симметричной триады  $N_- = N_+ = 0$  (Grande terremoto solitario - GTS))

Статистика землетрясений, использованных для построения графиков (рис. 1–3), представлена в таблице.

Таблица. Статистические характеристики триад

Тип триады	Магнитуда главного толчка $M_{ГТ}$	Количество событий		
		Главный толчок $N_{ГТ}$	Форшоки $N_-$	Афтершоки $N_+$
Классическая полная	$\geq 6.0$	332	1105	10433
Классическая укороченная	$\geq 6.0$	2066	0	21422
Зеркальная полная	$\geq 6.0$	104	1375	755
Зеркальная укороченная	$\geq 6.0$	156	237	0
Симметричная полная	$\geq 6.0$	121	186	186
Большое уединенное землетрясение	$\geq 6.0$	2480	0	0
<b>ВСЕГО:</b>		<b>5259</b>		

Примечание. Во всех случаях  $M_{-max} < M_{ГТ}$  и  $M_{+max} < M_{ГТ}$ .

**Аналог закона Бата для форшоков зеркальных триад.** Известный закон Бата гласит, что разность между магнитудой главного удара и магнитудой сильнейшего афтершока  $\Delta M = M_{ГТ} + M_{+max}$  в классической триаде приблизительно постоянна в том смысле, что почти не зависит от  $M_{ГТ}$ . В литературе обычно приводится значение  $\Delta M = 1.1 \div 1.2$ . Нас заинтересовало, а выполняется ли закон Бата для форшоков в зеркальной триаде? В результате оказалось, что для форшоков в зеркальной триаде также выполняется закон Бата (рис. 4). При этом зависимость магнитуды сильнейшего афтершока от магнитуды

главного толчка аппроксимируется формулой  $M_{+\max} = -0.53 + 0.85M_{\text{ГТ}}$ . Здесь  $M_{+\max}$  – магнитуда сильнейшего афтершока на интервале от 0 до 20 часов ( $R^2 = 0.84$ ). Зависимость магнитуды сильнейшего форшока от магнитуды главного толчка аппроксимируется формулой  $M_{-\max} = 1.5 + 0.61M_{\text{ГТ}}$  (коэффициент детерминации  $R^2 = 0.97$ ).

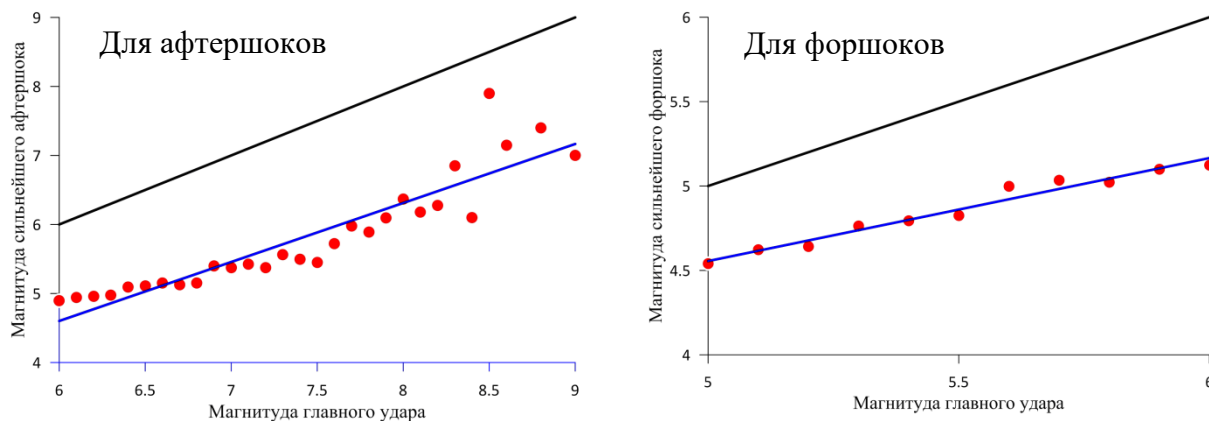


Рис. 4. Слева – сопоставление магнитуд сильнейших афтершоков и магнитуд главных ударов (закон Бата) в классических триадах; справа – аналог закона Бата для форшоков в зеркальных триадах; синие линии аппроксимируют экспериментальные красные точки. Черные линии соответствуют магнитудам главных толчков и проведены для наглядности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (№ 075-00693-22-00).

### Литература

- Гульельми А.В. Форшоки и афтершоки сильных землетрясений в свете теории катастроф // УФН. 2015. Т. 185. № 4. С. 415–439. DOI: [10.3367/UFN.0185.201504f.0415](https://doi.org/10.3367/UFN.0185.201504f.0415)
- Завьялов А.Д., Зотов О.Д. Новый способ определения характерного размера очаговой зоны // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 22–29. DOI: [10.31857/S0203030621010065](https://doi.org/10.31857/S0203030621010065)

### ON EARTHQUAKE TRIADS

Zavyalov A.D.<sup>1</sup>, Zotov O.D.<sup>1,2</sup>, Guglielmi A.V.<sup>1</sup>, Klain B.I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Geophysical Observatory "Borok" IPE RAS, Borok settlement, Nekouz district, Yaroslavl region, Russia

E-mail: [zavyalov@ifz.ru](mailto:zavyalov@ifz.ru)

УДК 550.34 + 550.8

## АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ГОРНЫЕ ПОРОДЫ РАЗНОГО СОСТАВА И ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Индаков Г.С.<sup>1,2</sup>, Казначеев П.А.<sup>2</sup>, Майбук З.-Ю.Я.<sup>2</sup>,  
Пономарев А.В.<sup>2</sup>, Матвеев М.А.<sup>2</sup>, Морозов Ю.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

*E-mail: [indakov.gs16@physics.msu.ru](mailto:indakov.gs16@physics.msu.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** Рассматриваются результаты анализа статистических параметров термически стимулированной акустической эмиссии для разных горных пород – гранитов, базальтов и метапесчаников. В рамках модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) дается интерпретация выявленной закономерности уменьшения *b*-value с увеличением активности в экспериментах по нагреву образцов горных пород. Описываются методы анализа изображений микроструктуры породы для исследования возможности наличия взаимосвязи между статистическими параметрами акустической эмиссии и параметрами микроструктуры породы.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, горные породы, термическое разрушение, *b*-value, микроструктура

Одним из важнейших фундаментальных направлений наук о Земле является исследование разрушений горных пород. Горные породы в земной коре подвергаются воздействию разнообразных давлений и температур. Для пород, слагающих глубинные зоны земной коры и вулканические постройки, характерно воздействие высоких температур, что приводит к термически стимулированному разрушению, а также изменению их прочностных свойств. Изучение процесса термического разрушения горных пород в лабораторных условиях является важным направлением развития экспериментальной геофизической науки [Казначеев и др., 2019а; 2019б]. Подобные исследования имеют особую значимость для анализа вулканической и глубокофокусной сейсмичности, а также могут найти прикладное применение в задачах повышения эффективности методов разработки месторождений углеводородов путем термического воздействия на породу-коллектор.

В качестве наиболее удобного и эффективного способа мониторинга развития разрушения используется регистрация акустической эмиссии (АЭ). События АЭ распределены в основном по закону Гутенберга – Рихтера [Казначеев и др., 2019а], что позволяет проводить аналогии между результатами лабораторных экспериментов и параметрами сейсмического процесса. В данной работе был проведен сравнительный анализ особенностей процесса термически стимулированного разрушения горных пород разного

происхождения на основе статистики импульсов термостимулированной АЭ (ТАЭ) для образцов горных пород. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

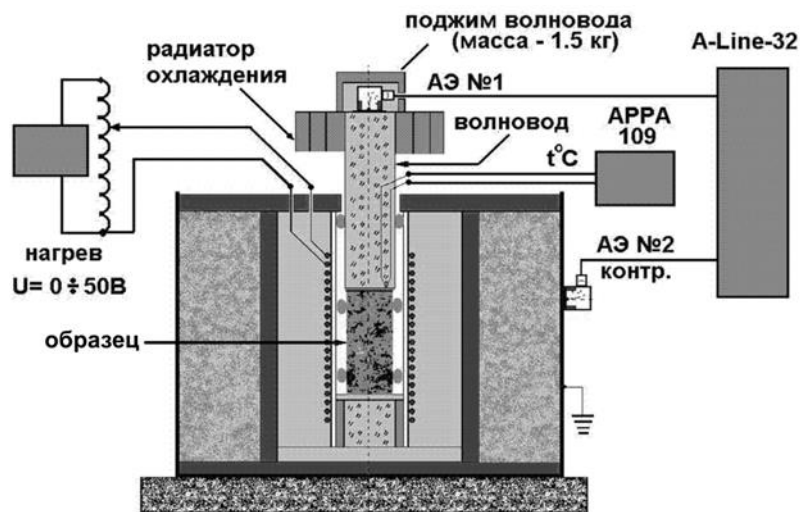


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Были рассмотрены образцы магматического происхождения – граниты и базальты – и образцы метаморфического происхождения – т. н. метапесчаники Северного Приладожья. Метапесчаники представляют собой образцы осадочных пород, подвергшихся раннему метаморфизму (более 1.5 млрд лет назад) при различных рТ-условиях в зависимости от глубины залегания.

Для анализа развития разрушения в целом были рассмотрены статистические параметры ТАЭ – активность и *b*-value. Эксперименты с образцами гранитов и базальтов были систематизированы по типу активности для возможности сравнения результатов. Параметр *b*-value был пересчитан для сопоставления с натурными данными [Индаков, Казначеев, 2021]. Для объяснения выявленных закономерностей изменения *b*-value предложена интерпретация результатов в рамках модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [Соболев, 2019].

Анализ данных экспериментов с образцами метапесчаников проводился для нескольких циклов нагрева для исследования влияния рТ-условий формирования породы на развитие разрушения. Выдвинута гипотеза о возможности наличия взаимосвязей между физически различными статистическими параметрами, характеризующими разрушение, и микроструктурой горных пород. Объектом исследования при изучении микроструктуры является зернистая структура горной породы как совокупность зерен, характерные величины каждого из которых измеримы, что позволяет оценить статистические параметры распределения величин (прежде всего, средний размер [Papadakis, 1964]). В работе рассмотрены методы оценки распределения зерен горных пород по размерам на основе



анализа микрофотографий шлифов, полученных на оптическом микроскопе. Среди них метод прямого измерения, метод пересечения опорных линий и планиметрический метод. Проведено сравнение некоторых методов, указаны их сильные и слабые стороны. Отмечено существенное влияние контрастности и четкости межзерновых границ на анализируемых изображениях на результат оценки распределения зёрен по размеру.

*Экспериментальные данные получены в рамках государственного задания ИФЗ РАН.*

### **Литература**

- Индаков Г.С., Казначеев П.А.* Оценка статистических параметров потока импульсов термически стимулированной акустической эмиссии в лабораторных экспериментах // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2021. № 1. 2110501.
- Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В.* Оборудование и методика исследования термоакустоэмиссионных эффектов памяти в горных породах // Сейсмические приборы. 2019а. Т. 55. № 1. С. 29–45.
- Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Смирнов В.Б., Бондаренко Н.Б.* К вопросу об анализе статистики событий акустической эмиссии по данным одиночного датчика в экспериментах с термическим разрушением горных пород // Геофизические исследования. 2019б. Т. 20. № 1. С. 52–64.
- Соболев Г.А.* Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ // Физика Земли. 2019. № 1. С. 166–179.
- Papadakis E.P.* From micrograph to grain size distribution with ultrasonic applications // Journal of Applied Physics. 1964. V. 35. No 5. P. 1586–1594.

## **ANALYSIS OF STATISTICAL PARAMETERS OF ACOUSTIC EMISSION UPON THERMAL TREATMENT OF ROCKS OF DIFFERENT COMPOSITION AND ORIGIN**

Indakov G.S.<sup>1,2</sup>, Kaznacheev P.A.<sup>2</sup>, Majbuk Z.-Ju.Ja.<sup>2</sup>, Ponomarev A.V.<sup>2</sup>,  
Matveev M.A.<sup>2</sup>, Morozov Ju.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

E-mail: [indakov.gs16@physics.msu.ru](mailto:indakov.gs16@physics.msu.ru)

УДК 551.24

## ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАЗОВАНИЯ РАЗРЫВА

Кержаев А.П.<sup>1</sup>, Меньшова И.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва, Россия*

*E-mail: [alex\\_kerg@mail.ru](mailto:alex_kerg@mail.ru)*

(стендовый доклад)

**Аннотация.** Рассматривается плита с остаточными напряжениями. Предполагается, что поле напряжений (деформаций) в плите удовлетворяет условиям плоской деформации. В некоторый момент времени граничные условия на двух противоположных сторонах плиты изменяются, что приводит к образованию новых свободных поверхностей (разрывов перемещений). Цель работы состоит в том, чтобы качественно оценить изменение напряженно-деформированного состояния плиты в результате образования разрыва.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, перераспределение остаточных напряжений с образованием новых свободных поверхностей

В горных породах всегда есть остаточные напряжения. Обработка камня, строительство шахт, глубоких тоннелей и т. д. в горном массиве практически всегда сопряжены с развитием старых и образованием новых разрывов (трещин), со стреляниями, горными ударами, оползнями и т. д. Все эти события являются проявлениями перераспределения остаточных напряжений. Рассматриваемые процессы очень сложны и с трудом поддаются математическому описанию. Теория остаточных напряжений на протяжении многих лет остается одной из главных проблем механики деформируемого твердого тела. К сожалению, мы почти ничего не знаем о механизмах образования остаточных напряжений в горной породе и законах их изменения (сброса) под влиянием тех или иных внешних факторов [Мороз, 2004; Тажибаяев, 2016]. Как правило, у нас есть лишь небольшая возможность судить об этом по их проявлениям, в частности, по геометрии трещин, образующихся при полном или частичном сбросе остаточных напряжений, по деформации контура области в результате образования трещин и т. д. Если речь идет о горной породе, то дело осложняется еще и тем, что остаточные напряжения, будучи всегда самоуравновешенными, имеют еще и ярко выраженный быстроколебательный характер. Это проявляется, например, в том, что трещинообразование в двух блоках горной породы, выпиленных из горного массива в непосредственной близости друг от друга, может быть абсолютно различным [Айтматов и др., 2006]. Поэтому экспериментально установить характер распределения остаточных напряжений в горной породе крайне сложно. В этой связи важно иметь набор математических моделей остаточных напряжений, на основе

которых можно было бы составить некоторое представление о законах распределения (и перераспределения) остаточных напряжений.

На рис. 1 изображена плита, в которой имеется четносимметричное относительно центральных координатных осей  $(x, y, z)$  поле остаточных напряжений. Будем считать, что напряженно-деформированное состояние плиты близко к плоской деформации. Предположим, что изменение граничных условий на сторонах плиты привело к тому, что нормальные и касательные напряжения на плоскостях  $(\pm d, y, z)$  стали близкими к нулю, что вызвало образование достаточно длинного разрыва, расположенного в плоскости  $(O, y, z)$  (рис. 1). Форма разрыва не зависит от координаты  $z$  и может быть любой, например, он может выходить (не выходить) на дневную поверхность плиты, его длина вдоль оси  $y$  может быть различной, а сам разрыв может располагаться на большей или меньшей глубине и т. д. Все эти факторы принципиально могут быть учтены в математической модели, что, конечно, приведет к ее усложнению.

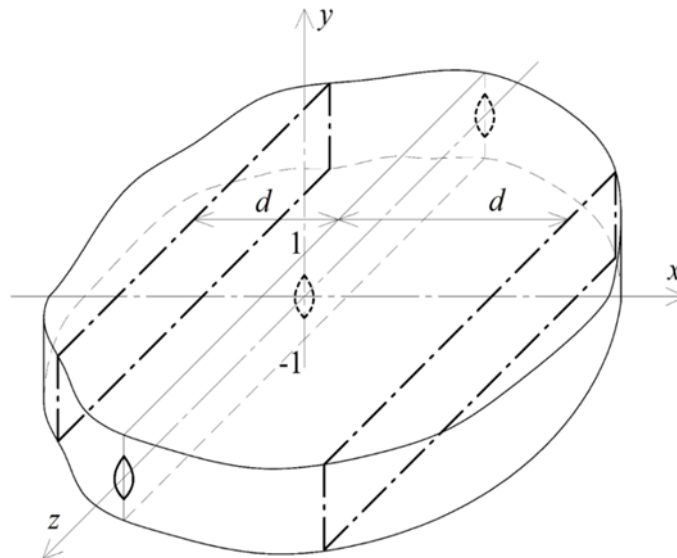


Рис. 1. Плита, в которой поле остаточных напряжений сбрасывается с образованием разрыва в плоскости  $(O, y, z)$

Далее вместо плоской деформации будем рассматривать плоское напряженное состояние, что практически не скажется на точности решения. Возьмем две горизонтальные деформированные полуполосы: правую  $\{\Pi^+: |y| \leq 1, x \geq 0\}$  и левую  $\{\Pi^-: |y| \leq 1, x \leq 0\}$  с симметрично искривленными длинными сторонами и торцами, форма которых (т. е. торцов) известна и равна  $\pm u(y)$  при  $x = \pm 0$  соответственно. Левая полуполоса является зеркальным отображением правой (рис. 2). Приложим к ним некоторые массовые нагрузки такие, что деформированные полуполосы станут полуполосами с прямолинейными сторонами, а затем непрерывно склеим их по торцам. В результате получим бесконечную полосу  $\Pi$  с остаточными напряжениями.

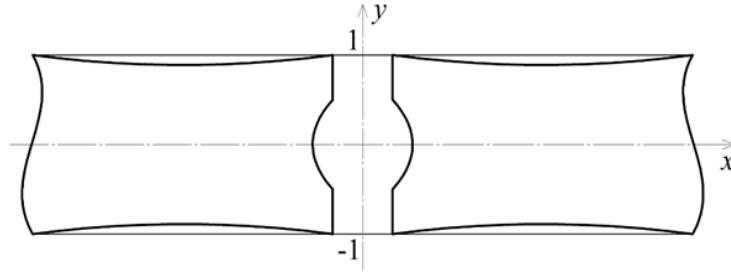


Рис. 2. Модель создания остаточных напряжений в бесконечной полосе

Остаточные напряжения (перемещения) в полосе  $\Pi = \Pi^+ + \Pi^-$  описываются следующими формулами (для полуполосы  $\Pi^+$  с  $\text{Re } \lambda_k < 0$ ) [Kovalenko et al., 2020]:

$$\begin{aligned} U(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} 2\text{Re} \left( u_k \frac{\xi(\lambda_k, y)}{\lambda_k M_k} \right) \frac{\text{Im}(-\bar{\lambda}_k e^{\lambda_k x})}{\text{Im} \lambda_k}, \quad V(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} 2\text{Re} \left( \frac{u_k \chi(\lambda_k, y)}{\lambda_k M_k} \right) \frac{\text{Im}(-\bar{\lambda}_k e^{\lambda_k x})}{\text{Im} \lambda_k}, \\ \sigma_x(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} 2\text{Re} \left( \frac{u_k s_x(\lambda_k, y)}{\lambda_k M_k} \right) \frac{\text{Im}(-\bar{\lambda}_k e^{\lambda_k x})}{\text{Im} \lambda_k}, \\ \sigma_y(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} 2\text{Re} \left( u_k \bar{\lambda}_k \frac{s_y(\lambda_k, y)}{\lambda_k^2 M_k} \right) \frac{\text{Im}(-\lambda_k e^{\lambda_k x})}{\text{Im} \lambda_k}, \quad \tau_{xy}(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} 2\text{Re} \left( u_k \bar{\lambda}_k \frac{t_{xy}(\lambda_k, y)}{\lambda_k M_k} \right) \frac{\text{Im}(-e^{\lambda_k x})}{\text{Im} \lambda_k}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \xi(\lambda_k, y) &= \left( \frac{1-v}{2} \sin \lambda_k - \frac{1+v}{2} \lambda_k \cos \lambda_k \right) \cos \lambda_k y - \frac{1+v}{2} \lambda_k y \sin \lambda_k \sin \lambda_k y, \\ \chi(\lambda_k, y) &= \left( \frac{1+v}{2} \lambda_k \cos \lambda_k + \sin \lambda_k \right) \sin \lambda_k y - \frac{1+v}{2} \lambda_k y \sin \lambda_k \cos \lambda_k y, \\ s_x(\lambda_k, y) &= (1+v) \lambda_k [(\sin \lambda_k - \lambda_k \cos \lambda_k) \cos \lambda_k y - \lambda_k y \sin \lambda_k \sin \lambda_k y], \\ s_y(\lambda_k, y) &= (1+v) \lambda_k [(\sin \lambda_k + \lambda_k \cos \lambda_k) \cos \lambda_k y + \lambda_k y \sin \lambda_k \sin \lambda_k y], \\ t_{xy}(\lambda_k, y) &= (1+v) \lambda_k^2 (\cos \lambda_k \sin \lambda_k y - y \sin \lambda_k \cos \lambda_k y) \end{aligned} \quad (2)$$

– собственные функции Папковича – Фадля;  $v$  – коэффициент Пуассона; числа  $\lambda_k$  – множество четверок  $\{\pm \lambda_k, \pm \bar{\lambda}_k\}_{k=1}^{\infty}$  всех комплексных нулей целой функции экспоненциального типа  $L(\lambda) = \lambda + \sin \lambda \cos \lambda$ . Через  $U(x, y)$  и  $V(x, y)$  обозначены умноженные на модуль сдвига  $G$  продольное и поперечное перемещения соответственно, которые возникают при сбросе остаточных напряжений с образованием разрыва  $2u(y) = U(+0, y) - U(-0, y)$  на стыке полуполос.

Числа  $u_k$  – коэффициенты Лагранжа. Они зависят от формы профиля разрыва  $u(y)$  и определяются по формуле ( $\delta$  – дельта-функция Дирака) [Kovalenko et al., 2020]

$$u_k = \int_{-1}^1 u(y) u_k(y) dy, \quad u_k(y) = \frac{1}{1+v} \left\{ \frac{\lambda_k \cos \lambda_k y}{\sin \lambda_k} - [\delta(y-1) + \delta(y+1)] \right\}. \quad (3)$$

Наконец, числа  $M_k = L'(\lambda_k)/2 = \cos^2 \lambda_k$  – нормирующие множители. Граничные условия на сторонах полосы выполняются точно, т. к.  $t_{xy}(\lambda_k, \pm 1) = s_y(\lambda_k, \pm 1) = 0$ .

Вырежем из полосы  $\Pi$  с остаточными напряжениями прямоугольник  $\{P: |y| \leq 1, |x| \leq d\}$ . Торцы прямоугольника  $P$  показаны пунктиром на рис. 3. Жирной линией

показан отрезок прямой  $|y| \leq \alpha$  ( $0 < \alpha \leq 1$ ), совпадающий с осью разрыва, образующегося при сбросе остаточных напряжений. К торцам прямоугольника приложим напряжения  $-\sigma_x(\pm d, y)$  и  $-\tau_{xy}(\pm d, y)$ , равные по величине и обратные по знаку напряжениям (1). Это решение можно найти в статье [Kovalenko et al., 2020].

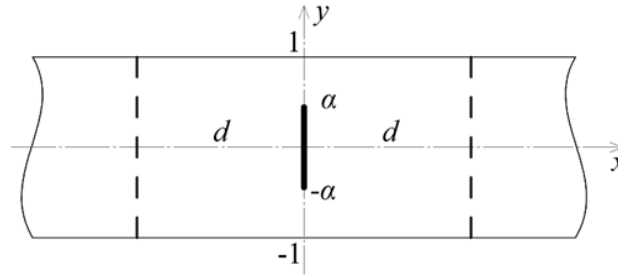


Рис. 3. Прямоугольник, вырезаемый из полосы с остаточными напряжениями

Складывая решения для полосы и прямоугольника, получим решение для свободного прямоугольника с остаточными напряжениями.

Будем считать, что образование новых свободных поверхностей  $\{x = \pm d, |y| \leq 1\}$  приводит к полному сбросу остаточных напряжений в бесконечной полосе так, что при этом вдоль оси  $y$  образуется разрыв, совпадающий с формой торцов полуполос, соединяемых в бесконечную полосу, стороны которого описываются формулой

$$u(y) = \begin{cases} K\sqrt{y^2 - \alpha^2}, & |y| \leq \alpha, \\ 0, & \alpha < |y| \leq 1. \end{cases} \quad (4)$$

Примем  $d = 0.5$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $\nu = 1/3$ .  $K$  – коэффициент, равный отношению длин малой и большой осей трещины (далее примем  $K = 0.05$ ).

На рис. 4а (слева) на участке  $|x| \leq d$  пунктирными кривыми показан вид горизонтальных сторон правой и левой полуполос перед соединением их в полосу с остаточными напряжениями. Сплошной кривой показаны формы горизонтальных сторон правого и левого прямоугольников после образования разрыва и сброса остаточных напряжений.

На рис. 4б (справа) пунктиру соответствуют напряжения  $\sigma_x(x, \pm 1)$  на участке  $|x| \leq d$  в бесконечной полосе с остаточными напряжениями, а сплошной кривой – напряжения  $\sigma_x(x, \pm 1)$  в правом и левом прямоугольниках после образования разрыва и сброса остаточных напряжений.

Перечислим критерии того, что разрыв образовался в результате сброса остаточных напряжений.

1. Из рис. 4а и 4б видно, что поперечные перемещения  $V(x, 1)$  горизонтальных сторон полосы и нормальные напряжения  $\sigma_x(x, \pm 1)$  после сброса остаточных напряжений весьма существенно (в 2-3 раза) отличаются от первоначальных.

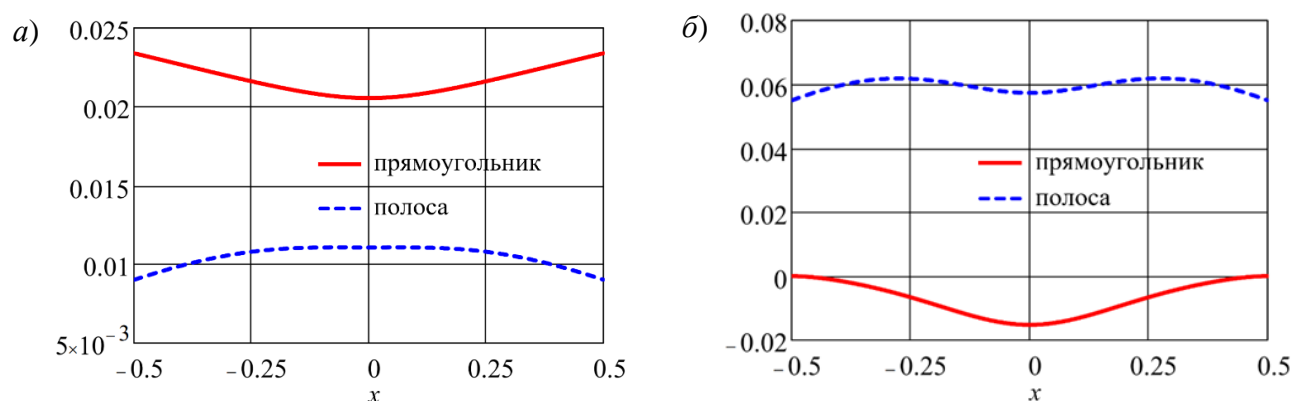


Рис. 4. а) Вид горизонтальных сторон полуполос до соединения их в полосу и вид горизонтальных сторон прямоугольников после образования разрыва и сброса остаточных напряжений  
б) Напряжения  $\sigma_x(x, \pm 1)$  до (пунктир) и после сброса остаточных напряжений

2. Второй важный критерий состоит в том, что, если в результате сброса остаточных напряжений образуются два прямоугольника, то правый и левый прямоугольники смещаются относительно друг друга в противоположных направлениях как абсолютно жесткие. Величина этого перемещения определяется из решения задачи. В том случае, когда задача не является четно- или нечетносимметричной, прямоугольники смещаются относительно друг друга также и в вертикальном направлении. Кроме того, они могут поворачиваться. Численные значения жестких перемещений определяются из решения задачи.

3. Третий критерий заключается в том, что после образования разрыва фрагменты области невозможно состыковать без зазоров.

### Литература

- Айтматов И.Т., Тажубаев К.Т., Казакбаева Г.О. Исследование остаточных напряжений в горных породах на основе поляризационно-оптического метода моделирования // Вестник КРСУ. Геомеханика. 2006. Т. 6. № 7. С. 13–18.
- Мороз А.И. Самонапряженное состояние горных пород. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. 288 с.
- Тажубаев К.Т. Напряжения, процессы деформации и динамического разрушения горных пород: в 2 т. Бишкек: Алтын Принт, 2016.
- Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Yu G. A boundary value problem in the theory of elasticity for a rectangle: exact solutions // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik. 2020. V. 71. Article 199. DOI:[10.1007/s00033-020-01425-2](https://doi.org/10.1007/s00033-020-01425-2)

## REDISTRIBUTION OF RESIDUAL STRESSES AS A RESULT OF THE FORMATION OF A DISCONTINUITY

Kerzhaev A.P.<sup>1</sup>, Menshova I.V.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: [alex\\_kerg@mail.ru](mailto:alex_kerg@mail.ru)

УДК 550.34.038.4

## НАИБОЛЕЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (DAS) В РОССИЙСКОЙ ГЕОФИЗИКЕ

Кислов К.В.<sup>1</sup>, Гравиров В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

E-mail: [kvkislov@yandex.ru](mailto:kvkislov@yandex.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** Новые разработки в методах мониторинга, основанные на технологии распределенного акустического зондирования (DAS), позволяют получать все более качественные данные для изображений недр и характеристик событий в сложных условиях. Мы проводим небольшой обзор геофизических задач, в которых применение DAS наиболее оправдан. Основной акцент делается на тех приложениях, в которых использование этой технологии перспективно именно для России. В работе приведены некоторые результаты, полученные в разных странах и опубликованные в научных журналах. Затронуты такие области, как вулканология, сейсмическое микрорайонирование, включая работы в условиях городов, морская геофизика, в том числе расширение возможностей предупреждения о цунами, горное дело и др. Также мы попытались очертить ограничения технологии DAS в геофизике и предложить направления дальнейшего совершенствования.

**Ключевые слова:** распределенное акустическое зондирование, DAS, вулканология, приповерхностная геофизика, сейсмостойкость, морская геофизика, горное дело, раннее предупреждение о цунами

Использование волоконно-оптических распределенных акустических датчиков (Distributed Acoustic Sensing – DAS) является новым подходом в геофизике и имеет ряд преимуществ [Distributed..., 2021; Кислов, Гравиров, 2022]. Во-первых, это получение более высокого пространственного разрешения (метры) при длине оптического волокна, которое и является чувствительным элементом, в десятки километров. Во-вторых, DAS может использовать коммуникационные волоконно-оптические сети, что позволяет быстрое развертывание с минимальным подключением и затратами. Мы решили обрисовать те геофизические приложения, в которых использование этой технологии перспективно для России и для которых DAS может стать новым ключевым решением.

Использование DAS в скважинах – хорошо освоенное приложение этой технологии. Среди преимуществ DAS: возможность использования в режиме реального времени, длительный срок службы, измерения вдоль всей скважины без перемещения датчиков, возможность использования в горизонтальных и узких скважинах и без остановки добычи, отсутствие электроники в скважине, нет необходимости извлекать оптический кабель из скважины [Gorshkov et al., 2022], при этом уменьшаются операционные риски.

**Исследование приповерхностных структур** – это прослеживание кровли скального основания, определение уровня грунтовых вод и оседания земли, картирование пещер, труб и туннелей, исследование вечной мерзлоты и сейсмическое микрорайонирование [Jiang et al., 2023]. В районах умеренной сейсмичности, особенно в городах, плотность сейсмической сети обычно мала. DAS может компенсировать нехватку сейсмостанций [Czarny et al., 2023]. Системы DAS имеют широкий диапазон (от мГц до кГц).

В [Soga, Luo, 2018] продемонстрировано определение спектрального отношения  $H/V$ . В [Cheng et al., 2023] получен профиль почвы с высоким разрешением, показывающий усредненную по времени  $V_{S30}$  и  $V_{S70}$ . [Ehsaninezhad et al., 2023] составили скоростную модель до 300 м глубины. В [Trabattoni et al., 2022] описана работа DAS на кабеле рядом с разломом, ответственным за землетрясение  $M = 6.9$  в Южной Италии в 1980 г. Волны с кажущимися скоростями от 60 и 400 м/с не согласуются с оценками приповерхностных волн  $P$  и  $S$  (3.200 и 1.700 м/с), что свидетельствует о сильном влиянии места DAS.

Естественным приложением DAS становится **морская геофизика**. При работах могут быть использованы темные волокна существующих телекоммуникационных кабелей, а также старые заброшенные и оборванные кабели, имеющие целый участок необходимой длины. Оптоволоконные кабели надежны, менее подвержены влиянию агрессивной среды, имеют длительный срок службы. К измеряемым в диапазоне от 0.01 до 100 Гц сигналам относятся сейсмические волны, колебания нагрузки от поверхностных штормовых волн, сдвиговые волны в низкоскоростных приповерхностных отложениях, акустические резонансы в толще воды. Технология DAS применима при изучении распределения осадочных пород на шельфе, микросейсмичности, картировании разломов и изучении их движений, при измерении океанических течений, океанических микросейсм и приливов [Viens et al., 2023], при телесеismicком и региональном сейсмическом мониторинге [Yu et al., 2023]. DAS позволяет проводить разведку недр и оценку мест под морское строительство, изучать динамику льда, морских млекопитающих, лоцировать корабли и подводные лодки [Sladen et al., 2019; Landrø et al., 2022]. На морском дне распределенные измерения можно использовать для косвенного изучения вулканической активности, обрушений склонов, переносов наносов и др. Возможности сейсморазведки определены в [Matsumoto et al., 2021]. Полученные сейсмические изображения можно использовать при крупномасштабных сейсморазведочных работах дна из-за высокого качества данных при экономии ресурсов. Новое интересное использование DAS проведено при геофизической и геотехнической оценке недр для морского строительства ветровой электростанции [Trafford et al., 2022]. Применения «морских» DAS многообразны и имеют значительный потенциал для развития.



Ключевые требования к **системе раннего предупреждения о цунами**, такие как работа в реальном времени, высокая пространственная плотность и выдвижение датчиков на значительное расстояние (до 150 км) в океан, присущи DAS, причем система способна детектировать поверхностную гравитационную волну в частотном диапазоне цунами [Williams et al., 2023; Ide et al., 2021]. Волны цунами возможно обнаружить, оценив деформацию подводного кабеля из-за изменения давления через эффект Пуассона [Veceril et al., 2022]. Сигналы с кабеля, заглубленного в дно, объясняются пороупругими деформациями в твердой земле. Волны цунами порождают довольно интенсивные придонные потоки. Колебания провисших над впадинами дна участков кабеля дают возможность судить о скорости потока и характеризовать цунами [Flores et al., 2023]. В настоящее время разрабатывается коммерческий вариант DAS СРПЦ [Tsunami..., 2023].

В **горном деле** основой для контроля и прогнозирования деформации вскрышных пород и склонов, наблюдения за динамикой трещиноватой водопроводящей зоны, мониторинга состояния конструкций, рудничного давления, устойчивости забоя, проседания поверхности земли и т. д. может служить DAS [Yuan et al., 2020; Tang, Cheng, 2018]. Упомянем взрывобезопасность DAS, что часто требуется в шахтных условиях. Оптические кабели располагают в вертикальных или наклонных скважинах. Основываясь на пространственных и временных вариациях деформации вдоль двух оптических кабелей, оказалось возможным четко определить прогрессирование структурной деформации и разрушения, а также развитие трещин во вскрышных породах. Равновесное состояние пластов горных пород необходимо изучать до и после добычи полезных ископаемых [Chai et al., 2022]. Технология DAS, как ожидается, заменит традиционный мониторинг шахт и обеспечит основу для прогнозирования оседания поверхности и оценки геоопасности в районах добычи [Du et al., 2022].

В последние годы объем использования DAS для **сейсмического мониторинга зданий и сооружений** резко возрос. Распределенная система измерения заменяет тысячи «тензодатчиков», «термопар» или «акселерометров» вдоль оптоволоконного кабеля, прикрепленного к конструкциям или встроенного в них, а состояние отдельных конструктивных элементов легко проверить не только при техническом контроле, но и мониторировать в процессе эксплуатации в составе сооружения [Barrias et al., 2016]. Встраивая DAS в здания, мосты, тоннели, плотины, можно оперативно получать данные об изменениях, выраженных напряжением или деформацией [Oskoui et al., 2020]. Используя данные мониторинга для обнаружения отклонений от проектных характеристик, оптимизировать эксплуатацию, ремонт и техническое обслуживание конструкции с течением времени [Glišić, Inaudi, 2007]. DAS может предложить мониторинг всей длины сооружения,

без пространственных промежутков. Возможно контролировать многие здания и сооружения с помощью одного оптоволоконного кабеля и интеррогатора. Измеряя собственные частоты колебаний конструкции, можно сделать всеобъемлющий набор наблюдений, полностью определить динамическое поведение, включая и колебательные режимы, и локализацию деформаций, вызванных повреждениями. Возможны беспрецедентно плотные наблюдения вдоль критически важных линий снаружи и внутри зданий, вплоть до прослеживания его вращательных движений. В связи с невысокой стоимостью оптического волокна, при периодических обследованиях здания не требуется его демонтаж, то есть нет проблемы идентичной установки датчиков. Виртуальные датчики не требуют синхронизации.

Многие задачи **вулканологии** могут быть решены в терминах деформации, без преобразования данных DAS в перемещение, скорость или ускорение. Магматические структуры способны генерировать вторичные сейсмические волны на собственных частотах. Резонансные моды уникальны для каждого объекта. Данные о деформациях могут быть использованы для их выявления и оценки параметров [Biagioli et al., 2023]. Одновременные измерения по нескольким волокнам могут дополнительно ограничить местоположения гипоцентров событий. Например, в [Allegra et al., 2023; Jousset et al., 2023] при исследованиях Этны задействованы оптические коммуникационные кабели в населенных пунктах, подводный кабель и специальный кабель, проложенный в скважине. Небольшое заглубление кабеля защищает его от вулканического пепла и бомб во время извержений [Nishimura et al., 2021]. Изменения местоположения источников используются для прогнозирования мест новых извержений и мониторинга вулканической активности.

В нашем обзоре не затронуты многие приложения, в которых оправдано применение DAS. Региональная сейсмометрия может стать более детальной, а каталоги более полными, телесеизмометрия может выиграть из-за длиннопериодных измерений DAS в местах, которые не охвачены качественными сейсмостанциями. Глобальное потепление, возможно, потребует тщательного мониторинга вечной мерзлоты. Отслеживание и прогнозирование селей, лавин, оползней и камнепадов также удобно проводить с помощью DAS. Однако для продвижения этой новой технологии в исследовательские проекты и в практику рутинных измерений потребуются прежде всего преодолеть некоторое недоверие, с которым встречается каждое начинание.

*Работа выполнена в рамках государственных заданий Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН и Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.*

## Литература

- Кислов К.В., Гравиров В.В.* Распределенное акустическое зондирование: новый инструмент или новая парадигма // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58. № 2. С. 5–38. DOI:[10.21455/si2022.2-1](https://doi.org/10.21455/si2022.2-1)
- Allegra M., Currenti G., Cannavò F., Jousset P., Prestifilippo M., Napoli R., Sciotto M., Di Grazia G., Privitera E., Palazzo S., Krawczyk C.* Deep learning approach for detecting low frequency events on DAS data at Vulcano Island, Italy // EGU General Assembly 2023. Vienna, Austria, EGU23-16459. DOI:[10.5194/egusphere-egu23-16459](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-16459)
- Barrias A., Casas J.R., Villalba S.* A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications // Sensors. 2016. V. 16. No 5. Article 748. DOI:[10.3390/s16050748](https://doi.org/10.3390/s16050748)
- Becerril C., Vidal-Moreno P.J., Sladen A., Ampuero J.-P., Gonzalez-Herraez M.* Towards Tsunami Early-Warning with Distributed Acoustic Sensing (DAS) // AGU Fall Meeting 2022. Chicago, IL, 2022. ID S16A-07. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022AGUFM.S16A..07B>
- Biagioli F., Metaxian J.-P., Stutzmann E., Ripepe M., Trabattoni A., Bernard P., Longo R., Diana G., Innocenti L., Capdeville Y., Bouin M.-P., Lacanna G.* Using Distributed Acoustic Sensing to Monitor and Investigate Eruptive Events at Stromboli Volcano, Italy // EGU General Assembly 2023. Vienna, Austria. EGU23-3955. DOI:[10.5194/egusphere-egu23-3955](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-3955)
- Chai J., Ouyang Y., Liu J., Zhang D., Du W.* Experimental evaluation of precise monitoring of multi-scale deformation failure of rock mass based on distributed optical fiber // Measurement. 2022. V. 199. Article 111381. DOI:[10.1016/j.measurement.2022.111381](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111381)
- Cheng F., Ajo-Franklin J.B., Tribaldos V.R.* High-resolution near-surface imaging at the basin scale using dark fiber and distributed acoustic sensing: Towards site effect estimation in urban environments // JGR Solid Earth. 2023. Article e2023JB026957. DOI:[10.1029/2023JB026957](https://doi.org/10.1029/2023JB026957)
- Czarny R., Zhu T., Shen J.* Spatiotemporal evaluation of Rayleigh surface wave estimated from roadside dark fiber DAS array and traffic noise // Seismica. 2023. V. 2. No 2. DOI:[10.26443/seismica.v2i2.247](https://doi.org/10.26443/seismica.v2i2.247)
- Distributed acoustic sensing in geophysics : methods and applications / Eds: Y. Li, M. Karrenbach, J.B. Ajo-Franklin. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2021. 301 p. DOI:[10.1002/9781119521808](https://doi.org/10.1002/9781119521808)
- Du W., Chai J., Zhang D., Ouyang Y., Liu Y.* Study on Quantitative Characterization of Coupling Effect between Mining-Induced Coal-Rock Mass and Optical Fiber Sensing // Sensors. 2022. V. 22. No 13. Article 5009. DOI:[10.3390/s22135009](https://doi.org/10.3390/s22135009)
- Ehsaninezhad L., Wollin C., Schwarz B., Krawczyk C.* Coherence-based Amplification of Rayleigh Waves from Urban Anthropogenic Noise recorded with Distributed Acoustic Sensing // EGU General Assembly 2023. Vienna, Austria. 2023. EGU23-12740. DOI:[10.5194/egusphere-egu23-12740](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-12740)
- Flores D.M., Sladen A., Ampuero J.-P., Mercerat E.D., Rivet D.* Monitoring deep Sea currents with seafloor distributed acoustic sensing // Earth and Space Science. 2023. V. 10. No 6. Article e2022EA002723. 96. <https://doi.org/10.1029/2022EA002723>
- Glišić B., Inaudi D.* Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007. 262 p. DOI:[10.1002/9780470517819](https://doi.org/10.1002/9780470517819)
- Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Turov A.T., Konstantinov Y.A., Lobach I.A.* Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective // Sensors. 2022. V. 22. No 3. Article 1033. DOI:[10.3390/s22031033](https://doi.org/10.3390/s22031033)

- Ide S., Araki E., Matsumoto H. Very broadband strain-rate measurements along a submarine fiber-optic cable off Cape Muroto, Nankai subduction zone, Japan // *Earth Planets Space*. 2021. V. 73. Article 63. DOI:[10.1186/s40623-021-01385-5](https://doi.org/10.1186/s40623-021-01385-5)
- Jiang W., Lin J., Liu B., Zhang R., Zhang B., Yang Z., Gu Y. Distributed acoustic sensing for shallow structure imaging using mechanical noise: A case study in Guangzhou, China // *Journal of Applied Geophysics*. 2023. Article 105139. DOI:[10.1016/j.jappgeo.2023.105139](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105139)
- Jousset P., Currenti G., Murphy S., Diaz Meza S.A., Napoli R., Gutscher M.-A., Riccobene G., Bonacorso A., Leto G., Aurnia S. Distributed fiber optic sensing observations at Etna volcano, Italy: An integrated vision // *XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)*. Berlin: 2023. DOI:[10.57757/IUGG23-4747](https://doi.org/10.57757/IUGG23-4747)
- Landrø M., Bouffaut L., Kriesell H.J., Potter J.R., Rørstadbotnen R.A., Taweasantanon K., Johansen S.E., Brenne J.K., Haukanes A., Schjelderup O., Storvik F. Sensing whales, storms, ships and earthquakes using an Arctic fibre optic cable // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. Article 19226. DOI:[10.1038/s41598-022-23606-x](https://doi.org/10.1038/s41598-022-23606-x)
- Matsumoto H., Araki E., Kimura T., Fujie G., Shiraishi K., Tonegawa T., Obana K., Arai R., Kaiho Y., Nakamura Y., Yokobiki T., Kodaira S., Takahashi N., Ellwood R., Yartsev V., Karrenbach M. Detection of hydroacoustic signals on a fiber-optic submarine cable // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. Article 2797. DOI:[10.1038/s41598-021-82093-8](https://doi.org/10.1038/s41598-021-82093-8)
- Nishimura T., Emoto K., Nakahara H., Miura S., Yamamoto M., Sugimura S., Ishikawa A., Kimura T. Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acoustic sensing system // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. Article 6319. DOI:[10.1038/s41598-021-85621-8](https://doi.org/10.1038/s41598-021-85621-8)
- Oskoui E.A., Taylor T., Ansari F. Reference-Free Dynamic Distributed Monitoring of Damage in Multispan Bridges // *Journal of Structural Engineering*. 2020. V. 147. No 1. DOI:[10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002858](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002858)
- Sladen A., Rivet D., Ampuero J.P., De Barros L., Hello Y., Calbris G., Lamare P. Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid Earth interactions on seafloor telecom cables // *Nature Communications*. 2019. V. 10. No 1. Article 5777. DOI:[10.1038/s41467-019-13793-z](https://doi.org/10.1038/s41467-019-13793-z)
- Soga K., Luo L. Distributed fiber optics sensors for civil engineering infrastructure sensing // *Journal of Structural Integrity and Maintenance*. 2018. V. 3. No 1. P. 1–21. DOI:[10.1080/24705314.2018.1426138](https://doi.org/10.1080/24705314.2018.1426138)
- Tang B., Cheng H. Application of Distributed Optical Fiber Sensing Technology in Surrounding Rock Deformation Control of TBM-Excavated Coal Mine Roadway // *Journal of Sensors*. 2018. V. 2018. Article 8010746. DOI:[10.1155/2018/8010746](https://doi.org/10.1155/2018/8010746)
- Trabattoni A., Festa G., Longo R., Bernard P., Plantier G., Zollo A., Strollo A. Microseismicity monitoring and site characterization with distributed acoustic sensing (DAS): The case of the Irpinia fault system (Southern Italy) // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2022. V. 127. Article e2022JB024529. DOI:[10.1029/2022JB024529](https://doi.org/10.1029/2022JB024529)
- Trafford A., Ellwood R., Wacquier L., Godfrey L., Minto C., Cjughlan M., Donohue S. Distributed acoustic sensing for active offshore shear wave profiling // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. Article 9691. DOI:[10.1038/s41598-022-13962-z](https://doi.org/10.1038/s41598-022-13962-z)
- Tsunami early warning system using available seafloor fiber cables / Aragon Photonics. SAFE PROJECT. <https://aragonphotonics.com/safe-project/> (последний просмотр 25.09.2023)
- Viens L., Spica Z.J., Delbridge B.G., Arbic B.K. Monitoring Shelf Sea Dynamics with Ocean-Bottom Distributed Acoustic Sensing // *ESS Open Archive*. 2023. DOI:[10.22541/essoar.167898504.40579102/v1](https://doi.org/10.22541/essoar.167898504.40579102/v1)
- Williams E.F., Ugalde A., Martins H.F., Becerril C.E., Callies J., Claret M., Fernandez-Ruiz M.R., Gonzalez-Herraez M., Martin-Lopez S., Pelegri J.L., Winters K.B., Zhan Z. Fiber-optic

observations of internal waves and tides // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2023. V. 128. Article e2023JC019980. DOI:[10.1029/2023JC019980](https://doi.org/10.1029/2023JC019980)

Yu J., Xu P., Yu Z., Wen K., Yang J., Wang Y., Qin Y. Principles and Applications of Seismic Monitoring Based on Submarine Optical Cable // Sensors. 2023. V. 23. No 12. Article 5600. DOI:[10.3390/s23125600](https://doi.org/10.3390/s23125600)

Yuan Q., Chai J., Ren Y., Liu Y. The Characterization Pattern of Overburden Deformation with Distributed Optical Fiber Sensing: An Analogue Model Test and Extensional Analysis // Sensors. 2020. V. 20. No 24. Article 7215. DOI:[10.3390/s20247215](https://doi.org/10.3390/s20247215)

## THE MOST PROMISING APPLICATIONS OF DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSING (DAS) IN RUSSIAN GEOPHYSICS

Kislov K.V.<sup>1</sup>, Gravurov V.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

E-mail: [kvkislov@yandex.ru](mailto:kvkislov@yandex.ru)

УДК 550.34

## СМЕРТОНОСНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2023 ГОДА: НЕОЖИДАННЫЕ СЮРПРИЗЫ?

Кособоков В.Г.<sup>1,2</sup>, Некрасова А.К.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Международная организация по сейсмической безопасности (ISSO),  
г. Арсита, Италия*

<sup>3</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

E-mail: [volodya@mitp.ru](mailto:volodya@mitp.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** Землетрясения 6 февраля 2023 г.,  $M7.8$  в 27 км к востоку от Нурдаги и  $M7.5$  в 4 км к юго-юго-востоку от Экинозю, Турция и землетрясение 8 сентября 2023 г.,  $M6.8$  вблизи Укаймеден, Марокко, делят 5–6 и 14 место в Списке 19 самых смертоносных землетрясений мира с 2000 года. Наблюдаемые сотрясения грунта были намного больше, чем максимальные оценки PGA с вероятностью превышения 10% в 50 лет в местах землетрясений на картах Глобальной программы оценки сейсмической опасности (GSHAP, 1999) и Глобальной модели землетрясений (GEM, 2018). Следует отметить, что возникновение разрушительных землетрясений в Турции ожидалось в дизъюнктивном D-узле A39 схемы морфоструктурного районирования Анатолии, распознанном Гельфандом и др. в 1973 г. и расположенном в пределах двух из 262 кругов исследования, охватывающих большую часть глобальных сейсмических поясов, где в продолжающемся Глобальном тестировании алгоритма M8 в режиме реального времени начиная с июля 2021 г. было определено время повышенной вероятности землетрясения из магнитудного диапазона  $M8.0+$  (подтверждено в последующих полугодичных обновлениях, последний раз в январе 2023 г.).

**Ключевые слова:** оценка сейсмической опасности, макросейсмическая интенсивность, пиковое ускорение грунта (PGA), распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений, прогноз землетрясений

Пара землетрясений 6 февраля 2023 года в Турции напомнила о том, что «Землетрясения не убивают людей, убивают здания!» Первое событие магнитудой  $M_W7.8$  произошло в 01:17 UTC, за ним последовало событие  $M_W7.5$  в 10:24:48 UTC с эпицентрами, расположенными в 27 км к востоку от Нурдаги и в 4 км к юго-юго-востоку от Экинозю (Турция) соответственно. Эти землетрясения [Dal Zilio, Ampuero, 2023] привели к обширному ущербу на площади свыше 350 000 км<sup>2</sup> и к гибели около шестидесяти тысяч человек в Турции и Сирии; оба землетрясения заняли 5–6 место среди самых смертоносных землетрясений с 2000 года. Различные агентства сообщили о макросейсмической интенсивности до XII (по шкале MMI) вблизи первого эпицентра и в Антакье, а также о максимальном пиковом ускорении грунта 2.2 g, зарегистрированном в парке Пазарджик-Беледиеси. GEOSCOPE определил магнитуду  $M_W = 8.0$  и 7.7, а Геофизическая служба Российской академии наук оценила  $M_S = 8.0$  и 7.8 с  $I_0 = \text{XI–XII}$  для обоих главных толчков.

Недавнее сильное землетрясение 8 сентября в Марокко магнитуды  $M_W 6.8$  с эпицентром в 54 км от горнолыжного курорта Укаймеден в Атласских горах произошло в 22:11 UTC и привело к масштабным разрушениям в регионе Марракеш-Сафи и к смерти по меньшей мере 2946 человек. Согласно измерениям на 452 станциях максимумы  $I_0 = IX$  и  $PGA = 1.23 g$  (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000kufc/shakemap/stations>), а сотрясения силой в VI баллов ощущались на расстояниях до 300 км от эпицентра.

После смертоносного землетрясения на Гаити в 2010 году систематическое сравнение финальной карты Глобальной программы оценки сейсмической опасности (GSHAP) максимальных оценок PGA с 10% вероятностью превышения в 50 лет (10% *poe* in 50 years) на местах реальных землетрясений выявило неадекватность этого «вероятностного» продукта [Kossobokov, 2010]; для 50% из 1320 сильных ( $M \geq 6.0$ ) землетрясений значения PGA на карте GSHAP были превышены более чем на 0.17 g за 10 лет с момента публикации [Giardini, 1999], что явно противоречит ожидаемой величине сотрясаемости. После мегаземлетрясения 2011 г. у Тихоокеанского побережья Тохоку (Япония) комплексный анализ показал, что неадекватность итоговой карты могла быть обнаружена участниками GSHAP на основе статистики землетрясений за период 1990–1999 гг. [Kossobokov, Nekrasova, 2012]. Десять лет назад [Wyss et al., 2012] показали, что «меры по смягчению последствий землетрясений в районах, где возможны сильные землетрясения, не могут основываться на картах GSHAP», и предупредили, «что международный проект Global Earthquake Model (<http://www.globalquakemodel.org/>) находится на неправильном пути, если продолжит основывать оценки сейсмического риска на стандартном методе оценки сейсмической опасности». Судя по всему, авторы GEM продолжают вводить в заблуждение заинтересованные стороны, предоставляя ошибочные карты сейсмической опасности [Pagani et al., 2018]. Заметим, что GEM в своем отказе от ответственности прямо характеризует избранную модель оценок как абсолютно бесполезную: “*The information included in this map must not be used for the design of earthquake-resistant structures or to support any important decision involving human life, capital and movable and immovable properties.*”

Напротив, статистика проверки бессрочных (на десятилетия) предсказаний «опасных» D-узлов и/или D-пересечений региональных схем морфоструктур [Gorshkov, Novikova, 2018], а также среднесрочные определения времен повышенной вероятности возникновения крупнейших землетрясений мира (на годы с локализацией в несколько размеров источника землетрясения-цели) [Ismail-Zadeh, Kossobokov, 2021; Kossobokov, Soloviev, 2021] подтверждают надежность использования распознавания образов при поэтапном решении задач оперативного прогноза землетрясений [Kossobokov et al., 2015].

**Неожиданные сюрпризы.** В табл. 1 перечислены все девятнадцать самых смертоносных землетрясений 21-го столетия. В последних трех столбцах показаны различия между макросейсмической интенсивностью в эпицентре землетрясения ( $I_{0,EVENT}$ ) и предсказанной картами GSHAP и GEM ( $I_{0,GSHAP}$  и  $I_{0,GEM}$ ), за которым следует отношение  $R_{PGA}$  между прогнозируемыми максимальными значениями PGA на картах GEM и GSHAP. Различия в макросейсмической интенсивности, полученные при самых смертоносных землетрясениях, все, кроме одного, положительные, их среднее и медианное значения составляют 2 единицы по шкале MMI. Занижение на 2 и более единиц MMI соответствует в лучшем случае переходу от VI баллов («легкие повреждения плохо построенных зданий, наблюдаются трещины и единичные случаи обрушения штукатурки») к VIII баллам («средние или тяжелые повреждения обычных капитальных зданий с частичным обрушением, большими трещинами в стенах, падением карнизов и дымоходов»).

**Таблица 1. Самые смертоносные землетрясения с 2000 года.** Примечания: при землетрясении погибло не менее 1000 человек, включая жертв цунами и других связанных с ним последствий; отношение  $R_{PGA} = mPGA_{GEM}/mPGA_{GSHAP}$  (\* с интерактивной карты GEM); приращения интенсивности  $\Delta I_0 = I_{0,EVENT} - I_{0,GSHAP}$  and  $\Delta I'_0 = I_{0,EVENT} - I_{0,GEM}$  рассчитаны как в [Кособоков, Некрасова, 2011] с округлением до ближайшего целого

Region	Date	M	Fatalities	$\Delta I_0$	$\Delta I'_0$	$R_{PGA}$
Sumatra-Andaman Islands	26 Dec 2004	9.0	227 898	4	4	1.20*
Port-au-Prince (Haiti)	12 Jan 2010	7.3	222 570	2	1	3.10
Wenchuan (Sichuan, China)	12 May 2008	8.1	87 587	3	3	1.60
Kashmir (northern India-Pakistan region)	8 Oct 2005	7.7	87 351	2	2	2.06
<b>Nurdağı (Turkey)</b>	<b>6 Feb 2023</b>	<b>7.8(8.0)</b>	<b>59 359+</b>	<b>1(2)</b>	<b>2</b>	<b>1.08</b>
<b>Ekinözü (Turkey)</b>		<b>7.5(7.7)</b>		<b>1(2)</b>	<b>2</b>	<b>1.11</b>
Bam (Iran)	26 Dec 2003	6.6	26 271	0	1	0.86
Bhuj (Gujarat, India)	26 Jan 2001	8.0	20 085	3	2	2.30
Off the Pacific coast of Tōhoku (Japan)	11 Mar 2011	9.0	19 759+	3	3	1.22*
Bharatpur (Nepal)	25 Apr 2015	7.8	8 964	2	2	1.01
Yogyakarta (Java, Indonesia)	26 May 2006	6.3	5 782	0	0	1.57
Sulawesi Island (Indonesia)	28 Sep 2018	7.5	4 340	2	2	1.62
Southern Qinghai (China)	13 Apr 2010	7.0	2 968	2	1	1.68
<b>Oukaïmedene (Morocco)</b>	<b>8 Sep 2023</b>	<b>6.8</b>	<b>2 946+</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2.09</b>
Boumerdes (Algeria)	21 May 2003	6.8	2 266	2	0	3.75
Nippes (Haiti)	14 Aug 2021	7.2	2 248	2	1	3.39
Nias Island (Indonesia)	28 Mar 2005	8.6	1 313	3	3	2.22
Padang (Southern Sumatra, Indonesia)	30 Sep 2009	7.5	1 117	1	1	1.38
Hindu Kush (Afghanistan)	25 Mar 2002	6.1	1 000+	-1	-1	0.74

Значения  $R_{PGA}$  со средним значением 1.8 и медианой 1.6 указывают на явное повышение оценок сейсмической опасности на карте GEM 2018 года по сравнению с картой GSHAP 1999 года в местах произошедших (в нашем случае наиболее смертоносных) землетрясений.



**Не сюрприз, ожидаемый в перспективе десятилетий.** Эпицентры землетрясений в Турции подтверждают полученные ранее результаты распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. Оба попали в область «опасных» D-пересечений морфоструктурного D-узла А39, распознанных в 1973 г. [Гельфанд и др., 1973; 1974] (рис. 1). Примечательно, что узел А39 характеризовался 10 из 11 признаков класса D при отсутствии признаков класса N «неопасных» узлов уже при переносе критериев высокой сейсмичности с территории Средней Азии в Анатолию и сопредельные регионы [Гельфанд и др., 1973].

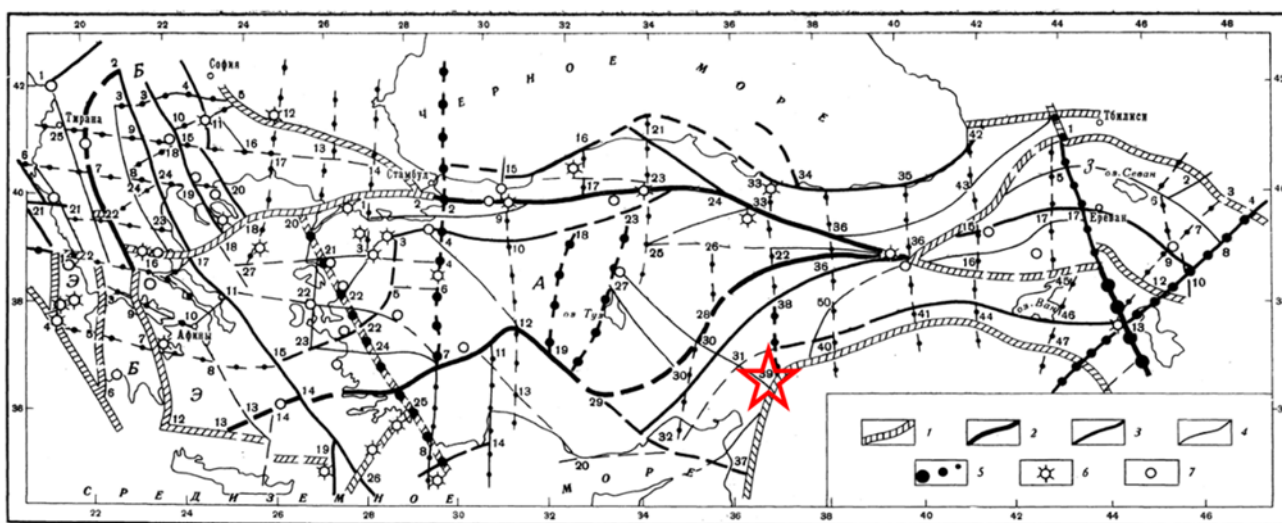


Рис. 1. Морфоструктурная схема Юго-Восточной Европы и Малой Азии по [Гельфанд и др., 1973]. 1–5 – морфоструктурные границы (1–4 – продольные, 5 – поперечные к простиранию основных форм рельефа): 1 – регионов; 2 – морфоструктурных стран; 3 – областей; 4 – районов. 6–7 – эпицентры сильных землетрясений с магнитудой  $6.5 \leq M \leq 6.9$ ,  $M \geq 7$ ; цифры – номера дизъюнктивных узлов; звезда – эпицентр главного толчка 06 февраля 2023 года

**Не сюрприз, ожидаемый в среднесрочной перспективе.** Последовательность землетрясений 6 февраля 2023 года также подтверждает предупреждение о магнитуде  $M8.0+$  в июле 2021 года – июне 2026 года, диагностированное в ходе продолжающегося Глобального теста алгоритма M8, проводимого по всему миру в режиме реального времени [Healy et al., 1992; Ismail-Zadeh, Kossobokov, 2021; Kossobokov, Soloviev, 2021] – оба эпицентра попали в два из семи кругов исследования (CI), где в январе 2023 г. диагностирована возможность землетрясений  $M8.0+$ , однако, за пределами мониторинга событий  $M7.5+$  (рис. 2).

Безусловно, более полный анализ, аналогичный проведенному в работе [Кособоков, Некрасова, 2011], необходим для окончательного вывода о том, что обновленные GEM Foundation вероятностные модели GSHAP «глубоко ошибочны и, очевидно, неприемлемы для ответственных оценок риска, способствующих предотвращению бедствия от

землетрясений». Подтверждением этого является отказ GEM от ответственности, приведенный нами во введении.

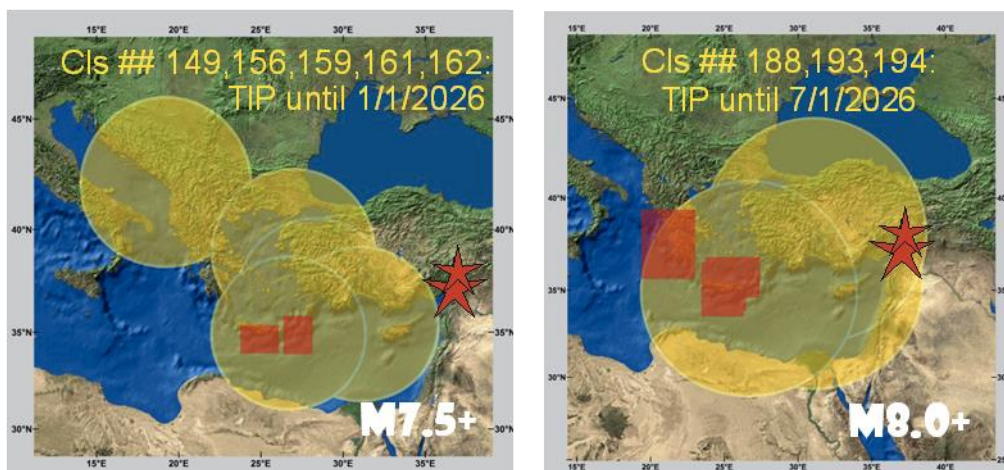


Рис. 2. Глобальное тестирование прогнозов М8-МSc: диагностика времени повышенной вероятности (TIP) в кругах исследования (CI) для января-июня 2023 года и эпицентры двух основных толчков последовательности землетрясений в Кахраманмарасе 2023 года (звезды). Примечания: прогнозы относятся к сейсмически активным районам в кругах исследования радиуса 427 и 667 км, при мониторинге событий  $M7.5+$  и  $M8.0+$  соответственно. Ошибочное уточнение прогнозов по алгоритму MSc [Kossobokov et al., 1990] (красные многоугольники) связано с неполнотой используемого в тесте каталога землетрясений в диапазоне  $M4+$

Авторы благодарны GEM Foundation за предоставление Глобальной карты сейсмической опасности (версия 2019.1) для сравнения с картой GSHAP 1999 года. Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда № 20-17-00180П.

### Литература

- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Калецкая М.С., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. Опыт переноса критериев высокой сейсмичности со Средней Азии на Анатолию и смежные регионы // Доклады АН СССР. 1973. Т. 210. № 2. С. 327–330. <https://www.mathnet.ru/rus/dan/v210/i2/p327>
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Калецкая М.С., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. II. Четыре региона Малой Азии и Юго-Восточной Европы // Машинный анализ цифровых сейсмических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М.: Наука, 1974. С. 3–40. (Вычисл. сейсмология; Вып. 7).
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. III. Случай, когда границы дизъюнктивных узлов неизвестны // Машинный анализ цифровых сейсмических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М.: Наука, 1974. С.41–64. (Вычисл. сейсмология; Вып. 7).
- Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Карты Глобальной программы оценки сейсмической опасности (GSHAP) ошибочны // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. № 38 (1). С. 65–76.
- Dal Zilio L., Ampuero J.P. Earthquake doublet in Turkey and Syria // Communications Earth & Environment. 2023. V. 4. 71. DOI:[10.1038/s43247-023-00747-z](https://doi.org/10.1038/s43247-023-00747-z)
- Giardini D. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) – 1992/1999 // Annales Geophysicae. 1999. V. 42. No 6. P. 957–974. DOI:[10.4401/ag-3780](https://doi.org/10.4401/ag-3780)

- Gorshkov A., Novikova O. Estimating the validity of the recognition results of earthquake prone areas using the ArcMap // *Acta Geophysica*. 2018. V. 66. No 5. P. 843–853. DOI:[10.1007/s11600-018-0177-3](https://doi.org/10.1007/s11600-018-0177-3)
- Healy J.H., Kossobokov V.G., Dewey J.W. A test to evaluate the earthquake prediction algorithm, M8 // USGS Open-File Report 92-401. 1992. 23 p. DOI:[10.3133/ofr92401](https://doi.org/10.3133/ofr92401)
- Ismail-Zadeh A., Kossobokov V. Earthquake Prediction, M8 Algorithm. In: Gupta H. (Ed.) *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham, 2021. P. 1893–1896. DOI:[10.1007/978-3-030-10475-7\\_157-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_157-1)
- Kossobokov V.G. Scaling laws and earthquake predictability in assessment of seismic risk // Lecture presented at the Advanced Conference on Seismic Risk Mitigation and Sustainable Development (ICTP, Miramare, Trieste - Italy, 10-14 May 2010). 2010. DOI:[10.13140/RG.2.2.32855.0912](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32855.0912)
- Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.W. Localization of intermediate term earthquake prediction // *Journal of Geophysical Research*. 1990. V. 95. No B12. P. 19763–19772. DOI:[10.1029/JB095IB12P19763](https://doi.org/10.1029/JB095IB12P19763)
- Kossobokov V.G., Nekrasova A.K. Global Seismic Hazard Assessment Program Maps are Erroneous // *Seismic Instruments*. 2012. V. 48. No 2. P. 162–170. DOI:[10.3103/S0747923912020065](https://doi.org/10.3103/S0747923912020065)
- Kossobokov V., Peresan A., Panza G.F. On operational earthquake forecast and prediction problems // *Seismological Research Letters*. 2015. V. 86. No 2. P. 287–290. DOI:[10.1785/0220140202](https://doi.org/10.1785/0220140202)
- Kossobokov V.G., Soloviev A.A. Testing Earthquake Prediction Algorithms // *Journal of the Geological Society of India*. 2021. V. 97. P. 1514–1519. DOI:[10.1007/s12594-021-1907-8](https://doi.org/10.1007/s12594-021-1907-8)
- Pagani M., Garcia-Pelaez J., Gee R., Johnson K., Poggi V., Styron R., Weatherill G., Simionato M., Viganò D., Danciu L., Monelli D. Global Earthquake Model (GEM) Seismic Hazard Map (version 2018.1 - December 2018). 2018. DOI:[10.13117/GEM-GLOBAL-SEISMIC-HAZARD-MAP-2018.1](https://doi.org/10.13117/GEM-GLOBAL-SEISMIC-HAZARD-MAP-2018.1)
- Wyss M., Nekrasova A., Kossobokov V. Errors in expected human losses due to incorrect seismic hazard estimates // *Natural Hazards*. 2012. V. 62. No 3. P. 927–935. DOI:[10.1007/s11069-012-0125-5](https://doi.org/10.1007/s11069-012-0125-5)

## DEADLY EARTHQUAKES OF 2023: UNEXPECTED SURPRISES?

Kossobokov V.G.<sup>1,2</sup>, Nekrasova A.K.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *International Seismic Safety Organisation (ISSO), Arsita, Italy*

<sup>3</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

E-mail: [volodya@mitp.ru](mailto:volodya@mitp.ru)

УДК 550.34

## О ВОЗМОЖНОСТИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРЕДСКАЗАНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ ПРОГНОЗА РАЗВИТИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

Костин В.М., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, Троицк, Россия

E-mail: [kostin@izmiran.ru](mailto:kostin@izmiran.ru)

(стендовый доклад)

**Аннотация.** Рассматривается взаимосвязь сильных  $M_w \geq 5.7$  землетрясений с развитием тропических циклонов (ТЦ) в 2023 г. Данные землетрясения сопоставляются с аналогичными событиями, произошедшими ранее, на удалении до 100 км от эпицентров. Показано, что в период суперлуния 2023 г. (новолуние 21 января, полнолуние 6 февраля), когда наблюдались экстремальные приливы и отливы, взаимодействующие с ТЦ, произошла серия землетрясений, указавших на неустойчивость блока коры на Анатолийской плите. Анализ событий в феврале-мае показал, что, используя прогностические метеорологические модели развития ТЦ как американскую – NCON, так и европейскую – GFS, с глубиной прогноза 5 дней, можно предсказать сильные землетрясения. Прогноз развития тайфуна Mawar 24–29 мая позволил правильно предсказать место и время более 50% сильных землетрясений.

**Ключевые слова:** землетрясение, тропический циклон, метеорологическая модель

Сильные землетрясения, как правило, наблюдаются в областях, указанных в среднесрочных прогнозах [Шебалин, 2006; Кособоков, Щепалина, 2020; Завьялов и др., 2022]. В работе [Костин и др., 2022] было показано, что литосферные землетрясения на глубине  $h > 20$  км коррелируют с развитием ТЦ. Однако задавался вопрос: такая связь устанавливалась после того, как произошло событие, а нельзя ли использовать такую зависимость для краткосрочного прогноза сильных землетрясений?

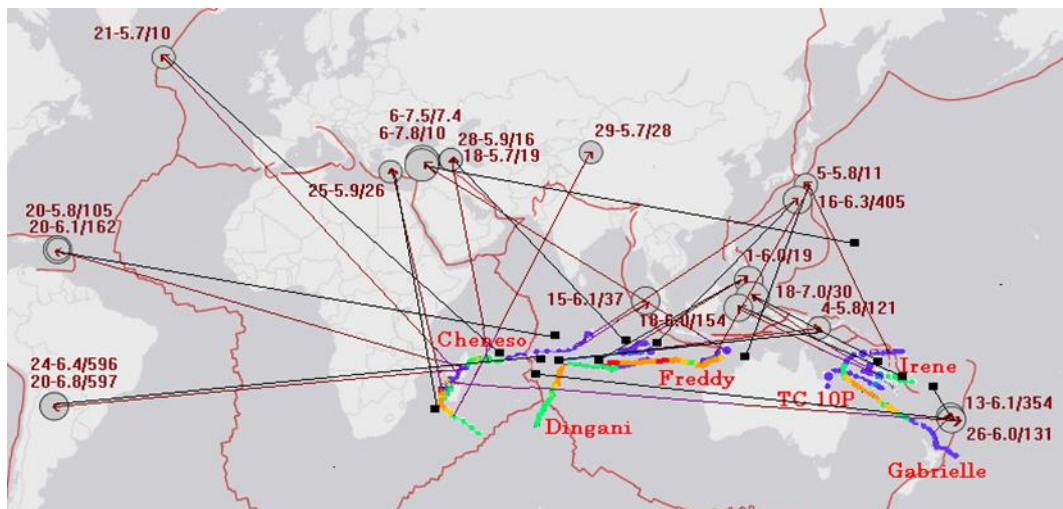


Рис. 1. Карта землетрясений  $M \geq 5.7$  с 15 января по 14 февраля 2023 г. (USGS) и траекторий ТЦ. Коричневые цифры около очага – день, магнитуда и глубина. Стрелки соединяют центры ТЦ и землетрясений. Черные линии отвечают более ранним событиям (см. табл.)

В настоящее время разработано несколько успешных метеорологических моделей развития ТЦ с глубиной прогноза до 5 дней, такие как американская модель – NCON и германская – GFS. В данном сообщении показано, что углубленный анализ развития ТЦ мог предсказать разрушительное землетрясение в Турции 2023-02-06, и дан прогноз сильных землетрясений 26–30 мая по данным метеорологических моделей за 3 дня до проведения конференции в ИЗМИРАН 29–31 мая 2023 г. [Костин и др., 2023].

На рис. 1 представлена карта землетрясений  $M \geq 5.7$  с 15 января по 14 февраля 2023 г., на которую нанесены траектории ТЦ и их имена. Стрелками соединены положения ТЦ в момент удара с очагом. Дополнительно на карту нанесены положения более ранних ТЦ (см. табл.) – черные квадраты, когда произошли землетрясения в круге радиуса 100 км около центров, указанных на рис. 1. Они соединены черными линиями.

Как следует из рис. 1, большинство сильных землетрясений последовало при прохождении ТЦ 10P и Irene около о-ва Н. Каледония и ТЦ Cheneso через Мадагаскар. Здесь наблюдались максимальные приливы и отливы за последние 1030 лет. Сильнейшее землетрясение  $M_w 7.0$  произошло в Молукском море около Tobelo, Индонезия 18 января 2023 г. в 06:06 UT при приближении ТЦ Irene к Н. Каледонии в момент максимального прилива. Всего в Молукском море с 18 по 29 января 2023 г. произошло 78 землетрясений  $M_w > 4.5$  на глубине  $h > 30$  км.

Таблица. Центры землетрясений  $M \geq 5.7$  с 15 января по 14 февраля 2023 г. и более ранние землетрясения, вызванные в этих областях соответствующими ТЦ

№	День	Координаты (°с.ш./°в.д.)	Магнитуда ( $M_w$ )	Имя ТЦ 2023	Эпицентр (°ю.ш./°в.д.)	Имя ТЦ	Эпицентр (°ю.ш./°в.д.)	Дата	Магнитуда ( $M_w$ )
1	01–15	2 / 98	6.1	Cheneso	12 / 77.7	Robyn	15.6 / 90.9	2010-04-06	7.8
2	16	29 / 139.3	6.3	Cheneso	12 / 73.4	Abele	12.5 / 85.7	2010-11-30	6.8
3	18	-0.01 / 123	6.0	Irene	17.9 / 162.2	Evan	18.4 / 177	2012-12-17	6.1
4	18	2.3 / 123.9	7.0	Irene	18 / 163.3	Harry	17.9 / 162	1989-02-10	7.1
5	18	38.4 / 44.9	5.7	Cheneso	13.7 / 53.4	Ferdinand	12.5 / 119	2020-02-23	5.8
6	20	16.1 / -62	6.1	Cheneso	16.6 / 46.7	Bentojana	8.3 / 78.7	2004-11-21	6.3
7	20	-26.7 / -63	6.8	Cheneso	17.2 / 46.3	Arola	12.9 / 71	2004-11-12	6.1
8	21	57.4 / -33	5.7	Cheneso	19 / 45	Ernest	10.2 / 54.7	2005-01-18	5.7
9	25	35.7 / 28.5	5.9	Cheneso	20 / 43	Ernest	27.5 / 47.1	2005-01-23	5.8
10	26	-30.2 / 179	6.0	Cheneso	20.1 / 42.8	Danilo	17.1 / 67.9	2021-01-08	6.3
11	28	38.4 / 44.9	5.9	Cheneso	26.6 / 42.5	Ferdinand	12.5 / 119	2020-02-23	5.8
12	29	40 / 82.3	5.7	Dingani	11 / 94.9	No			
13	02–01	7.7 / 126	6.0	Dingani	12.7 / 90.7	Faraji	14.9 / 79.8	2021-02-07	6.0
14	04	-6.4 / 146.2	5.8	Dingani	12.7 / 91.2	Cebile	15.6 / 77.3	2018-01-30	5.6
15	05	32.6 / 141.6	5.8	Freddy	11.8 / 117.8	Haikui	13.5 / 122	2017-11-09	6.0
16	06	37.2 / 37	7.8	Freddy	11.9 / 119.2	Barbara	-21.6 / 155	2001-06-25	5.5
17	11	3.6 / 126.7	5.9	Freddy	17.8 / 103	Hilda	20.6 / 122	2017-12-28	5.7
18	13	-29.4 / -179	6.1	Gabrielle	35.4 / 176	Kevin	22.3 / 173	2023-03-04	6.9

После прохождения ТЦ Cheneso о-ва Мадагаскар 25 января 2023 г. в 12:37 UT последовало землетрясение Lardos, Греция в момент максимума отлива. Серия из 5 коровых

землетрясений 28–29 января 2023 г. магнитудой от 5.9 до 4.5 в Khowu показала, что блок коры на Анатолийской плите неустойчив.

На фазе как резкого роста интенсивности, так и изменения направления движения ТЦ Freddy, совпавшего с полнолунием, произошло безфоршоковое землетрясение  $M_w 7.8$  в середине блока – около Kahramanmaraş, Турция – и последующая, большая серия коровых землетрясений вдоль неустойчивого блока. Отметим, что землетрясение 2001-06-25 около Kahramanmaraş  $M_w 5.5$  произошло при прохождении ТЦ Barbara около острова Honolulu.

Увеличением сильных землетрясений в моменты максимальных приливов и отливов около островов объясняется эффектом рычага, т. к. эти острова связаны с Африканской и Австралийской плитами. В моменты отливов возрастает динамический напор ветра ТЦ на возросшую поперечную поверхность островов. В моменты приливов и при подходе ТЦ к островам увеличивается действие приливных и нагонных волн на острова. Оба эти механизма увеличивают момент сил, с которым острова как рычаг воздействуют на связанные с ними литосферные плиты [Костин и др., 2022]. Отметим, что при прохождении ТС Harry через Н. Каледонию 1989-02-10 последовало 30 ударов около Tabela с периодом  $\sim 11$  с, характерным для прибрежных волн.

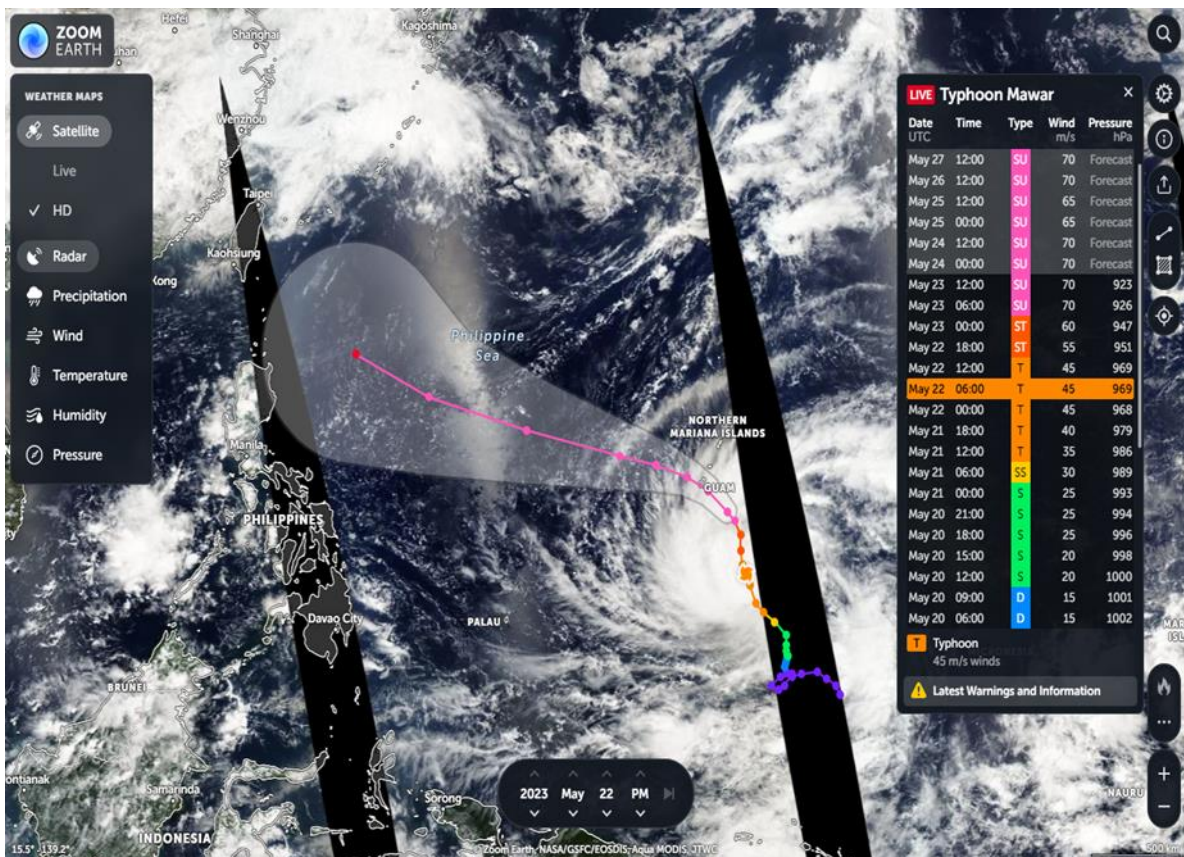


Рис. 2. Траектория и интенсивность тайфуна Mawar до 23 мая 2023 г. и прогноз на 24–29 мая

Так как существует связь ТЦ с землетрясениями (примером служит рис. 1), то можно попытаться определять место и время сильных землетрясений из анализа совместной базы

данных динамики прошедших ТЦ и землетрясений. Подход к решению такой задачи был представлен в презентации [Костин и др., 2023] 29 мая 2023 г. на конференции в ИЗМИРАН.

На рис. 2 приведены данные ZOOM EARTH, NOAA по динамике тайфуна Mawar. Движение ТЦ 19–20 мая вокруг т.  $5^{\circ}$ с.ш.  $149^{\circ}$ в.д. сопровождалось серией сильных землетрясений около островов Loyalty ( $23.2^{\circ}$ ю.ш.  $170.7^{\circ}$ в.д.). День, магнитуда и глубина указаны на рис. 3 коричневым цветом. В дальнейшем по прогнозу ТЦ Mawar должен был перемещаться через Гуам к о-ву Тайвань. На рис. 3 между ними проведена красная стрелка с датами.

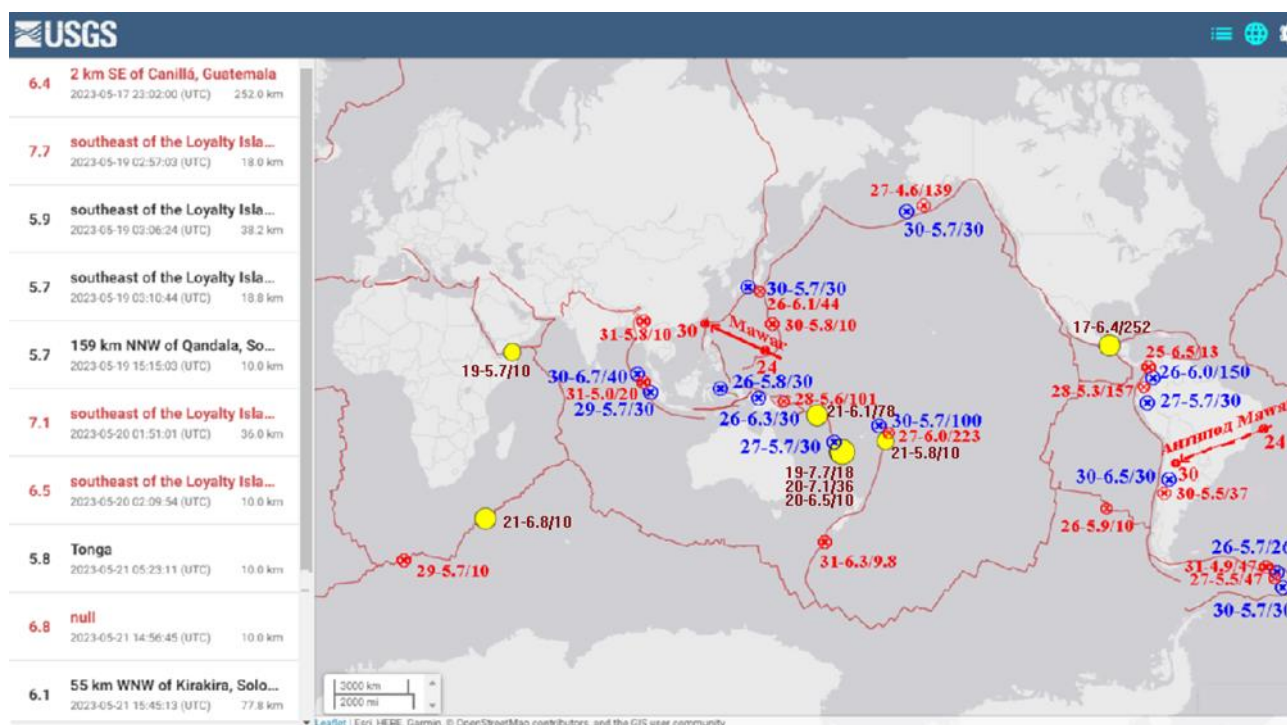


Рис. 3. Синим цветом указаны землетрясения, которые наблюдались ранее при прохождении ТЦ по Филиппинской плите и антипода через Южную Америку (по работам авторов) – прогноз. Красным – реальные землетрясения при прохождении ТЦ Mawar. Коричневым – землетрясения 15–23 мая 2023 года

Исходя из предполагаемой динамики ТЦ Mawar, найдены похожие ТЦ и указаны на рис. 3 синим цветом землетрясения с учетом сдвига по времени (прогноз). Впоследствии 31 мая 2023 г. на рис. 3 были нанесены реальные землетрясения (указаны красным цветом).

Почти всем сформировавшимся ТЦ в 2023 году [Костин и др., 2023] можно указать землетрясение, акустическое воздействие которого на тропическое возмущение вызывало его самоорганизацию [Абурджания и др., 2013].

Отмечены отдельные моменты, когда одновременно наблюдались резкое изменение траектории ТЦ и сильное землетрясение, а также землетрясения без ТЦ [Костин и др., 2023], по-видимому, триггером таких воздействий являются приливные силы [Николаев, 1994].

Если среднесрочные прогнозы сильных землетрясений [Шебалин, 2006; Кособоков, Щепалина, 2020; Завьялов и др., 2022] дополнить триггерами ТЦ, то можно, опираясь на существующие метеорологические модели, прогнозировать отдельные сильные землетрясения  $M > 5.7$  за 3–5 дней. Для этого необходимо расширить экспериментальную базу, связывающую место и интенсивность ТЦ с землетрясениями на различных разломах.

### *Литература*

- Абурджаниа Г.Д., Харшладзе О.А., Чаргазия Х.З. Самоорганизация ВГВ структур в неоднородной ионосфере. 2. Нелинейные вихревые структуры // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53. № 6. С. 797–808. DOI:[10.7868/S0016794013060023](https://doi.org/10.7868/S0016794013060023)
- Завьялов А.Д., Морозов А.Н., Алёшин И.М., Иванов С.Д., Холодков К.И., Павленко В.А. Метод среднесрочного прогноза землетрясений «Карта ожидаемых землетрясений» (КОЗ): Опыт использования и перспективы развития // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 2. С. 114–131. DOI:[10.21455/GPB2022/2-6](https://doi.org/10.21455/GPB2022/2-6)
- Кособоков В.Г., Щепалина П.Д. Времена повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира: 30 лет проверки гипотезы в реальном времени // Физика Земли. 2020. № 1. С. 43–52. DOI:[10.31857/S0002333720010068](https://doi.org/10.31857/S0002333720010068)
- Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. Особенности взаимосвязи тропических циклонов и землетрясений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 125–139. DOI:[10.21046/2070-7401-2022-19-1-125-139](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-125-139)
- Костин В.М., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. Особенности воздействия тропических циклонов на литосферные плиты в суперлуние 2023. Краткосрочный прогноз сильных землетрясений // Симпозиум «Физические основы прогнозирования геофизических процессов и событий». ИЗМИРАН 29-31 мая 2023. <http://www.izmiran.ru>
- Николаев В.А. Реакция сильных землетрясений на фазы земных приливов // Физика Земли. 1994. № 11. С. 49–58.
- Шебалин П.Н. Методология прогноза сильных землетрясений с периодом ожидания менее года // Алгоритмы прогноза землетрясений. М.: ГЕОС, 2006. С. 5–180. (Вычислительная сейсмология; Вып. 37).

## **ON THE POSSIBILITY OF SHORT-TERM PREDICTION OF STRONG EARTHQUAKES USING METEOROLOGICAL DATA FROM FORECASTING THE DEVELOPMENT OF TROPICAL CYCLONES**

**Kostin V.M., Ovcharenko O.Ya., Trushkina E.P.**

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, RAS, Moscow, Troitsk, Russia*

*Email: [kostin@izmiran.ru](mailto:kostin@izmiran.ru)*



УДК 550.34

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ РАЗЛОМНОЙ СТРУКТУРЫ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ЧЕКУРОВСКОЙ АНТИКЛИНАЛИ

Куляндина А.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,  
г. Якутск, Россия

<sup>2</sup> Якутский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба» РАН, г. Якутск, Россия

E-mail: [Albineku28@gmail.com](mailto:Albineku28@gmail.com)

(устный доклад)

**Аннотация.** В представляемой работе затрагиваются некоторые аспекты, касающиеся структуры разломной сети и распределения эпицентров землетрясений на территории Чекуровской антиклинали, расположенной в низовьях реки Лена в зоне сочленения Предверхооянского краевого прогиба со складчатыми сооружениями Верхояно-Колымской системы мезозойд (Арктическая зона Якутии).

**Ключевые слова:** Чекуровская антиклиналь, эпицентры землетрясений, разрывные нарушения, складчатая структура

На основе сейсмостатистических данных и инструментальных наблюдений за XX и начало XXI века исследуется участок на стыке Лаптевоморской и Хараулахской зон в Арктической части территории Якутии [Шубаев и др., 2014]. Анализ территориального распределения эпицентров землетрясений (по данным каталога землетрясений за 1963–2022 гг. Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН) различной интенсивности как сильных  $Kp > 12.0$ , так и слабых  $Kp > 6.0$ , произошедших на территории Чекуровской антиклинали (рис. 1), показал, что землетрясения происходят не только на разломах, но и на различных расстояниях от них. Основой для построения схемы разломно-блокового строения участка детальными исследованиями послужили материалы о разрывных нарушениях различных систем и порядков государственной геологической съемки масштаба 1:1 000 000 [Геологическая..., 2021], тектоническая модель местности по комплексу геофизических методов и литературные описания разломов.

За 60-летний период инструментальных наблюдений на данной территории произошло 65 землетрясений с  $Kp > 6.0$ , эпицентры которых практически равномерно распределены по всей указанной территории, а не только вдоль разломов. Помимо разломов для объяснения проявления слабых землетрясений можно отметить, что указанная территория входит в область активных процессов горообразования, которое продолжается и в современную эпоху. В результате крупные коробчатые антиклинали (Чекуровская, Булкурская, Левокенгдейская и Верхнекенгдейская) сформировались как сложные складчатые структуры со своими специфическими особенностями [Тектоника..., 2001].

Перераспределение литостатического давления в антиклинальных складках от начала их формирования и дальнейшего развития приводит к разрывам сплошности среды силами растяжения, то есть к сейсмическим проявлениям.



Рис. 1. Юго-западное вертикальное крыло Чекуровской антиклинали и одноименный надвиг

Участок исследования характеризуется плавно изменяющимся отрицательным магнитным полем, на фоне которого выделены Кюсюрская и Чекуровская относительно положительные аномалии, в плане соответствующие одноименным антиклиналям. Интенсивность поля силы тяжести, форма и размер аномалий позволяют сопоставить их с фронтальным Чекуровским надвигом [Трофименко, 2011], который обнажается на реке Нелегер и погружающийся к востоку. В широкой зоне надвига породы интенсивно деформированы, разбиты многочисленными разломами и смяты в мелкие интенсивные складки, которые в гравитационном поле отражаются высокоамплитудными зонами градиентов северо-западного простирания.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).*

### ***Литература***

- Геологическая карта Республики Саха (Якутия). ГЗ ФГБУ «ВСЕГЕИ» от 14.01.2021 г. № 049-00016-21-00.
- Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Отв. ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 571 с. EDN: SWEFCD
- Трофименко С.В.* Структура и динамика геофизических полей и сейсмических процессов в блоковой модели земной коры: дисс. на соиск. уч. степ. д-ра геол.-мин. наук. Нерюнгри: Томский политехнический университет, 2011. 223 с. EDN: QFLURP
- Шибаяев С.В., Козьмин Б.М., Петров А.Ф., Тимиршин К.В.* Лено-Таймырская аномалия сейсмоактивной среды на шельфе моря Лаптевых // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2014. Вып. 2. С. 105–109.

## **SPATIAL CORRELATION OF THE FAULT STRUCTURE AND DISTRIBUTION OF EARTHQUAKE FOCUS ON THE TERRITORY OF THE CHEKUROV ANTICLINE**

Kulyandina A.S.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*

<sup>2</sup> *Yakutsk Branch of the Geophysical Survey, RAS, Yakutsk, Russia*

*E-mail: [Albineku28@gmail.com](mailto:Albineku28@gmail.com)*

УДК 550.34

## ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ СРЕДЫ В РАЙОНЕ ХИБИНСКОГО И ЛОВОЗЕРСКОГО МАССИВОВ (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ) НА ОСНОВЕ МИГРАЦИИ ДАННЫХ PS И SP ФУНКЦИЙ ПРИЕМНИКА

Кухмазов А.С., Гоев А.Г.

*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН,  
г. Москва, Россия*

*E-mail: [A-Kukhmazov@mail.ru](mailto:A-Kukhmazov@mail.ru)*

(стендовый доклад)

**Аннотация.** В работе представлены новые результаты исследования глубинного скоростного строения земной коры и верхней мантии в районе Хибинской и Ловозерской щелочных интрузий. Методом функций приемника, с применением миграции, впервые получены двумерные модели среды под изучаемыми структурами. Определена сложная топография коро-мантийного перехода. Выявленные эффекты интерпретированы как следы палеозойского плюмового события.

**Ключевые слова:** сейсмология, Кольский полуостров, PRF, SRF, глубинное строение, плюм, миграция

Изучение глубинной структуры земной коры сейсмическими методами является актуальной задачей, прежде всего, по причине сосредоточения в ней извлекаемых природных ресурсов. Центральная часть Кольского региона славится своей уникальной геологией и минералогией, а также богатством рудопроявлений. При этом территория изучена неравномерно, особенно в части глубинного строения.

Настоящие материалы посвящены использованию метода приемных функций для определения структуры земной коры и верхней мантии в районе Хибинского и Ловозерского щелочных массивов. Одними из первых работ, где были даны теоретические обоснования метода, вероятно, являются [Langston, Burdick, 1977; Vinnik, 1977]. Впоследствии методика приобрела широкое распространение и успешно применялась для решения задач восстановления глубинного строения в различных тектонических обстановках [Винник и др., 2017; Kind et al., 1995; 2017]. Причем было сформировано две школы: первая для восстановления глубинных скоростных разрезов использует инверсию [Винник, Косарев, 1981], вторая – миграцию [Ammon et al., 1990]. Глубинное строение Хибинского и Ловозерского щелочных массивов уже определялось методом функций приемника с применением инверсии [Dricker et al., 1996; Гоев и др., 2021]. Целью представленной работы является применение техники миграции для получения двумерного глубинного разреза через изучаемые структуры.

Данные, включенные в обработку, были получены двумя широкополосными сейсмическими станциями, расположенными в непосредственной близости от Хибинской

и Ловозерской интрузий. Схема взаимного расположения массивов и сейсмических станций приведена на рис. 1. Станции укомплектованы датчиками STS-1 (Ловозеро) и STS-2.5 (Апатиты) и ведут регистрацию с 1992 года (Ловозеро) и с 1997 года (Апатиты), что обеспечивает высокое качество и богатый набор использованного в представленной работе экспериментального материала.



Рис. 1. Расположение сейсмических станций на карте GoogleEarth. Белой линией показан профиль, по которому определялось глубинное строение

Основными этапами обработки являются:

- Сбор большого количества землетрясений за значительный период времени (по станции Апатиты (APZ9) около 12000 за период с 15.12.1997 по 29.06.2020; по станции Ловозеро (LVZ) более 6000 за период с 12.12.1992 по 23.02.2022), что позволило гарантировать статистически достоверную обеспеченность полученных результатов.
- Обработка обменных как  $P_s$ -, так и  $S_p$ -волн методом приемных функций:  $P$ -wave receiver function (PRF) и  $S$ -wave receiver function (SRF).
- Проведение деконволюции сигналов от далеких землетрясений четырьмя различными методами для выбора оптимального решения.
- Определение, наряду с теоретическим азимутом на источник и угла падения, «оптимальных» экспериментальных, полученных по результатам деконволюции.
- Миграция времен как  $P_s$ -, так и  $S_p$ -фаз.

Глубинные сейсмические разрезы после миграции по обработке обменных  $P_s$ - и  $S_p$ -волн представлены на рис. 2. Характер расположения границ обмена волн  $P_s$ , показанный

в виде увеличения амплитуд положительных фаз  $P_s$ , свидетельствует об увеличении скорости  $S$ -волн на соответствующих глубинах (рис. 2а), где происходит обмен первичной волны  $P$  на волну  $SV$ . Аналогичным образом интерпретируются и результаты, представленные на рис. 2б, за исключением того, что речь идет о первичных волнах  $S$ , которые обмениваются на волну  $P$  на участках резкого увеличения скорости  $P$ -волн с глубиной.

Можно отметить схожесть характера распределения сейсмических границ на обоих рисунках, а также более отчетливые определения обменных границ для волн  $P_s$  (рис. 2а) по сравнению с волнами  $S_p$  (рис. 2б), вызванные, вероятно, большим отношением сигнал/шум для вступлений  $P$ -волн по сравнению с вступлениями  $S$ -волн на фоне коды волн  $P$ .

На полученных разрезах отчетливо проявляется сложная топография залегания сейсмических границ. В частности, прослеживается куполообразное поднятие границы Мохо и обменных границ непосредственно под коро-мантийным переходом, возможно, связанные с генезисом самих плутонов. По комплексу геолого-геохимических данных формирование плутонов относится к палеозойскому плюмовому событию [Chashchin, Mitrofanov, 2014], и обнаруженные аномалии могут быть связаны именно с ним.

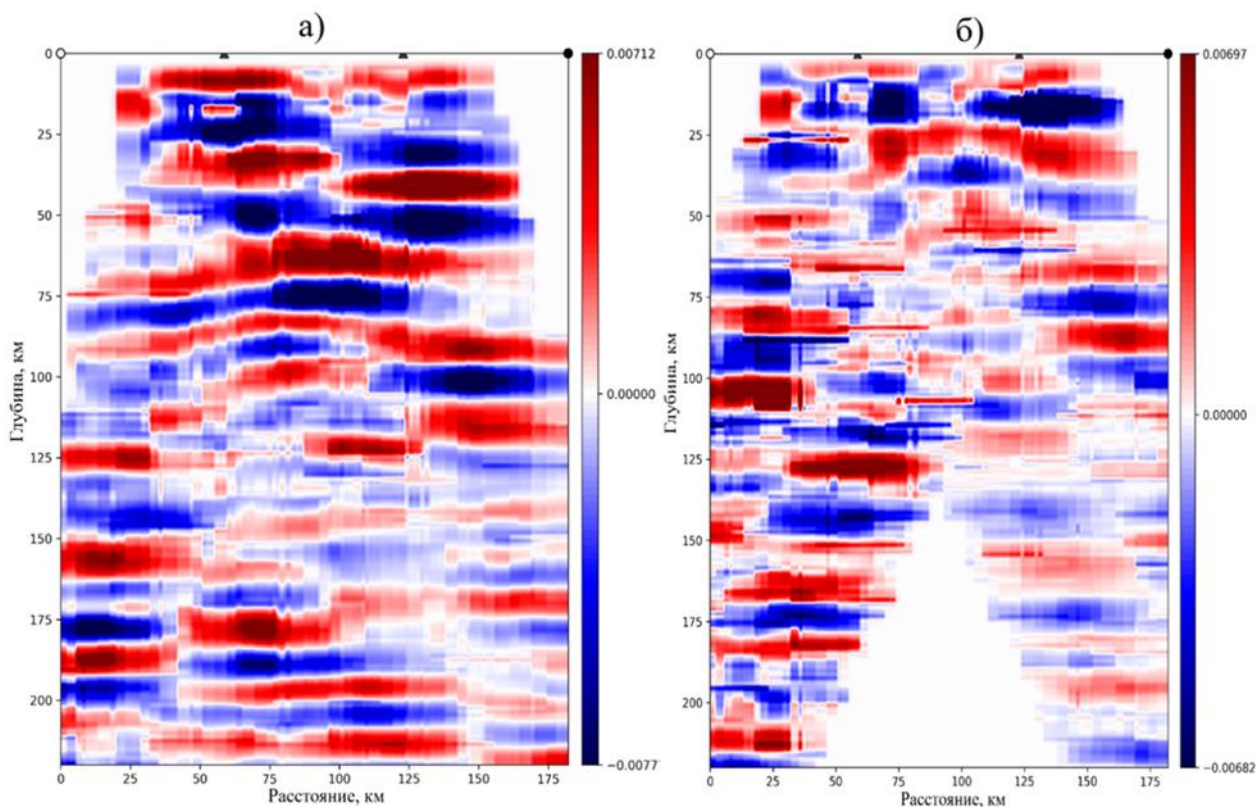


Рис. 2. Результат миграции функций приемника PRF (а) и SRF (б) методом обратного пробега по лучу по профилю, простирающемся вдоль горного массива Хибин. Справа от рисунков – шкала амплитуд: меняется от отрицательных фаз (синий цвет) до положительных (красный цвет). Сверху от разрезов черными трапециями показано местоположение сейсмических станций, принимавших участие в обработке: Апатиты (левая трапеция) и Ловозеро (правая трапеция)

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием № 122040400015-5 и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира». Выражаю благодарность моему отцу, Кухмазову С.У., за помощь при написании данного материала.

### Литература

- Винник Л.П., Косарев Г.Л. Определение параметров коры по наблюдениям телесеизмических объемных волн // Доклады АН СССР. 1981. Т. 261. № 5. С. 1091–1095.
- Винник Л.П., Орешин С.И., Цыдыпова Л.Р., Мордвинова В.В., Кобелев М.М., Хритова М.А., Тубанов Ц.А. Кора и мантия Байкальской рифтовой зоны по данным приемных функций продольных и поперечных волн // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 695–709.
- Гоев А.Г., Санина И.А., Орешин С.И., Резниченко Р.А., Тарасов С.А., Федоров А.В. Скоростное строение литосферы Хибинского и Ловозерского массивов (северо-восточная часть Балтийского щита) методом функции приемника // Физика Земли. 2021. № 5. С. 30–40.
- Ammon C.J., Randall G.E., Zandt G. On the non-uniqueness of receiver function inversions // Journal of Geophysical Research. 1990. V. 95. P. 15303–15318.
- Chashchin V.V., Mitrofanov F.P. The Paleoproterozoic Imandra-Varzuga rifting structure (Kola Peninsula): intrusive magmatism and minerageny // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. V. 5. No 1. P. 231–256. DOI:[10.5800/GT-2014-5-1-0126](https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0126)
- Dricker I.G., Roecker S.W., Kosarev G.L., Vinnik L.P. Shear-wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath the Kola peninsula // Geophysical Research Letters. 1996. V. 23. No 23. P. 3389–3392.
- Kind R., Handy M.R., Yuan X., Meier T., Kämpf H., Soomro R. Detection of a new sub-lithospheric discontinuity in central Europe with S-receiver functions // Tectonophysics. 2017. V. 700. P. 19–31.
- Kind R., Kosarev G.L., Petersen N.V. Receiver function at the station of the German Regional Seismic Network (GRSN) // Geophysical Journal International. 1995. V. 121. P. 191–202.
- Langston C.A., Burdick L.J. Modeling crustal structure through the use of converted phases in teleseismic body-wave forms // Bulletin of the Seismological Society of America. 1977. V. 67. No 3. P. 677–691.
- Vinnik L.P. Detection of waves converted from P to SV in the mantle // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1977. V. 15. No 1. P. 39–45.

## DEEP STRUCTURE OF THE ENVIRONMENT IN THE AREA OF THE Khibiny AND LOVOZERO MASSIFS (KOLA PENINSULA) BASED ON DATA MIGRATION OF $P_S$ AND $S_P$ RECEIVER FUNCTIONS

Kukhmazov A.S., Goev A.G.

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, RAS, Moscow, Russia

E-mail: [A-Kukhmazov@mail.ru](mailto:A-Kukhmazov@mail.ru)

УДК 550.34+550.240

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Левина Е.А., Ружич В.В.

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия*

*E-mail: [levina@crust.irk.ru](mailto:levina@crust.irk.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** Рассмотрена геоинформационная система «Prediction», являющаяся инструментом для экспертной оценки сейсмической обстановки в Байкальской рифтовой зоне, с целью составления среднесрочного прогноза землетрясений. Результатом ее многолетнего использования является в среднем 70% успешных выявлений мест ожидаемых землетрясений. Наиболее трудно определяемым параметром прогноза является время ожидания сейсмического события. Предпринята попытка формализации определения прогнозных признаков методом распознавания образов, рассмотренным на примере Хубсугульского землетрясения. Анализ применения метода ко всем землетрясениям с  $K \geq 15$ , произошедшим в период 1963–2022 годов, показал оправданность его использования для определения мест ожидаемых землетрясений, однако для уточнения параметра времени их возникновения необходима дополнительная информация.

**Ключевые слова:** среднесрочный прогноз землетрясений, геоинформационная система, метод распознавания образов

Как известно, прогноз может быть краткосрочным (дни, часы), среднесрочным (месяцы, годы) и долгосрочным (десятилетия). До сих пор некоторые успехи достигнуты в среднесрочном и долгосрочном виде прогноза [Ружич, 1997; Соболев, 2011; Ружич, Левина, 2022], но достижение приемлемых результатов в краткосрочном прогнозе представляется маловероятным в обозримом будущем.

Для составления среднесрочного прогноза в Институте земной коры СО РАН разработана ГИС «Prediction». Схема алгоритма ее работы показана на рис. 1. Рассматриваемая ГИС является экспертной системой, то есть результат ее работы представляется в виде набора карт и графиков, которые анализируются экспертом и им же определяются места возможных землетрясений. Координаты таких мест заносятся в базу данных ГИС, после чего по ним строится карта, где указаны места предполагаемых эпицентров и потенциально опасные районы, ограниченные изосейстами 5 баллов [Левина, 2016]. Такой тип систем имеет свои достоинства и недостатки. Главное достоинство: эксперт использует свой опыт, который не всегда удается формализовать. Но это же является и главным недостатком, так как в прогноз вносится элемент субъективности.

Любой прогноз должен содержать три параметра – указание на место («М»), энергию («Е») и время («Т») ожидаемого землетрясения. Многолетний опыт разработки среднесрочного прогноза землетрясений с  $K \geq 13$  для Байкальской рифтовой зоны (БРЗ)



показывает, что средний показатель оправданности прогноза по параметру «М» составляет 70%, а самым проблемным является параметр «Т», из-за чего время ожидания землетрясения в предсказанном месте иногда приходится продлевать.

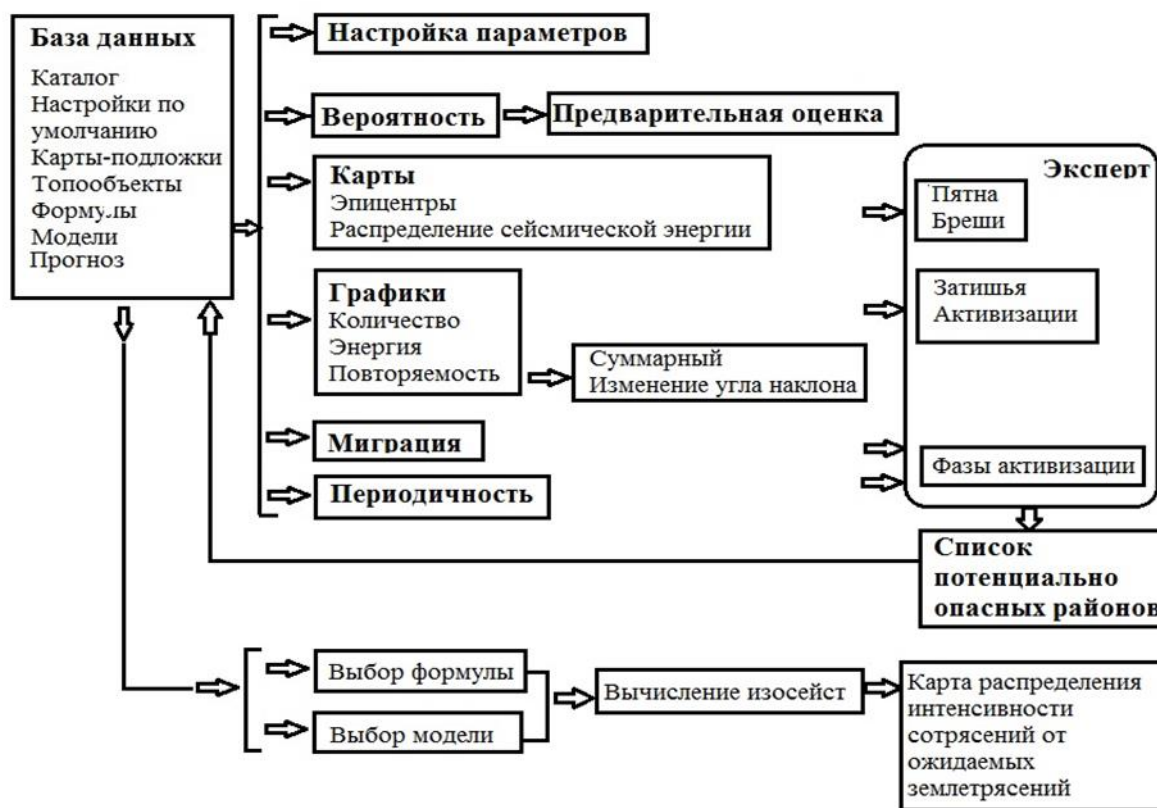


Рис. 1. Схема алгоритма работы ГИС «Prediction»

Предпринятая в данной работе попытка формализовать процедуру составления прогноза основана на методе распознавания образов. В качестве прогнозных признаков рассматривались: 1 – наличие сейсмической бреши, 2 – наличие предшоковой активизации и сейсмического затишья, 3 – наличие сейсмоактивного разлома или разломного узла. Использовался каталог землетрясений БРЗ, предоставленный Байкальским филиалом Геофизического центра СО РАН (г. Иркутск). Каталог землетрясений фактически является представленной в табличной форме функцией вида  $E = f(\varphi, \lambda, t)$ , где  $E$  – энергия события,  $\varphi, \lambda$  – его географические координаты,  $t$  – время, когда событие произошло.

Для обнаружения сейсмических брешей (признак 1) строится карта распределения сейсмической энергии за определенный промежуток времени, то есть рассматриваемая функция приобретает вид  $E = f(\varphi, \lambda)$ , и выявление бреши сводится к поиску локальных минимумов в полученной матрице.

В основе двухстадийной модели подготовки сейсмического события лежит представление о том, что сильному землетрясению («шоку») предшествует стадия предшоковой сейсмической активизации и сейсмическое затишье [Ружич, Левина, 2022].

Предполагается, что по максимальной энергии событий в предшоковой стадии и длительности затишья можно судить об энергии ожидаемого землетрясения и времени его реализации (признак 2). С этой целью для определенной территории строится график распределения выделившейся сейсмической энергии во времени. Таким образом, наша функция сводится к виду  $E=f(t)$ , и поиск предшоковой активизации заключается в нахождении локального максимума временного ряда.

Геологический признак 3 не связан прямо с каталогом землетрясений, и для его учета необходима оцифрованная карта ранжированных по протяженности сейсмоактивных разломов для определения наличия активного разлома в рассматриваемой пространственной ячейке. В качестве примера рассмотрено Хубсугульское землетрясение 11.01.2021 ( $K = 15.7$ ). На рис. 2 слева показана карта распределения выделившейся сейсмической энергии в юго-западной части БРЗ. Подсчет сделан за интервал времени 2010–2020 гг. с помощью пространственного окна  $0.5^\circ$ . Видно, что землетрясение произошло в районе сейсмической брешы, расположенной на месте пересечения субмеридионального активного Хубсугульского разлома (рифтогенного сброса) и локального разлома северо-западного направления (взбросо-сдвига). Брешь сформировалась как минимум за 11 лет до события.

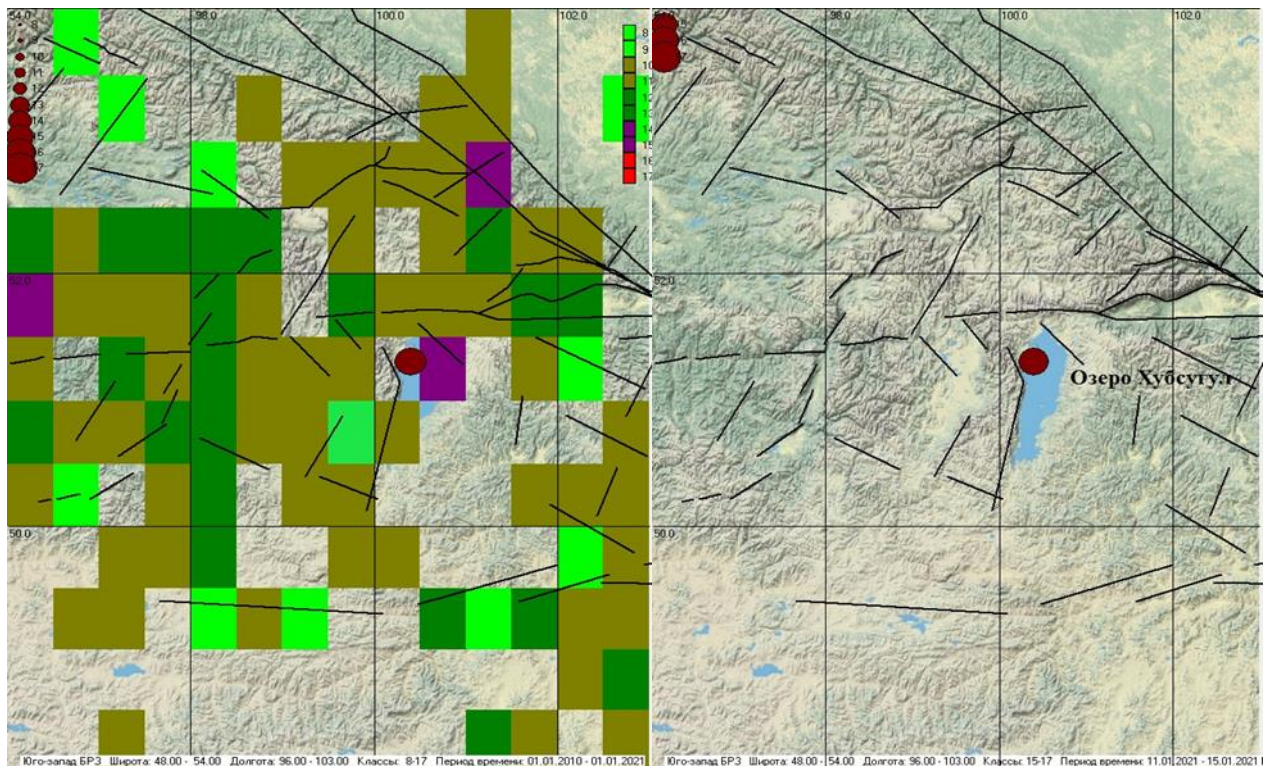


Рис. 2. Справа – карта юго-западного фланга БРЗ (район озера Хубсугул). Черными линиями показаны разломы, красным кружком – эпицентр Хубсугульского землетрясения 11.01.2021 ( $K = 15.7$ ). Слева - карта распределения выделившейся сейсмической энергии в том же районе БРЗ за интервал времени 2010–2020 гг., подсчитанного с помощью квадратного окна со стороной  $0.5^\circ$

Для этого же землетрясения строился график распределения выделившейся сейсмической энергии за 11 лет до него с временным шагом 1 год в квадратной ячейке с центром в эпицентре землетрясения и со стороной  $2^\circ$  (рис. 3). Предшоковая стадия с  $K_{пр} = 14$  явно присутствует за 7 лет до основного события, а отношение энергии максимального землетрясения предшоковой стадии  $K_{пр}$  и энергии произошедшего землетрясения  $K_3$  составляет  $K_3 / K_{пр} \approx 1.12$ .

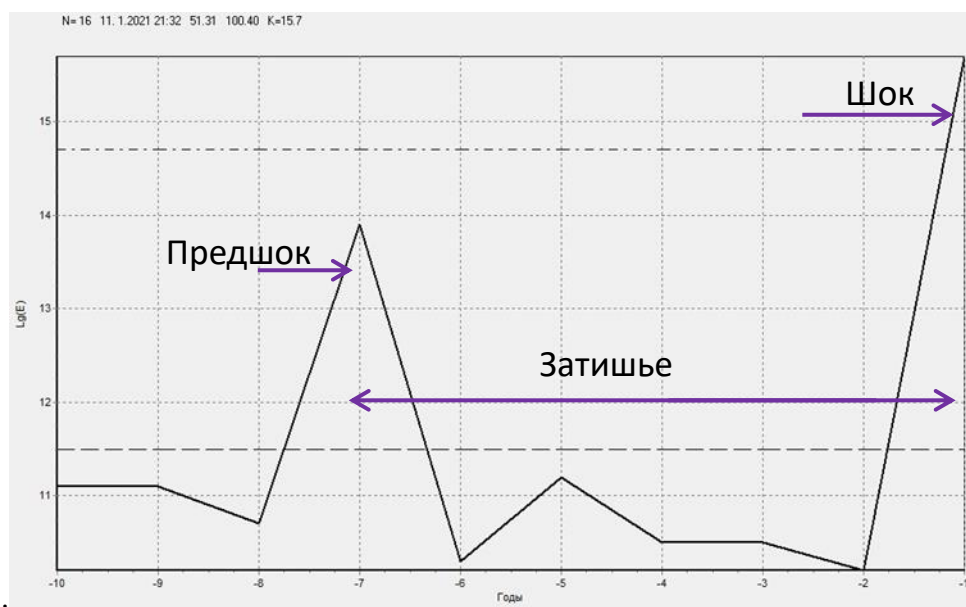


Рис. 3. График распределения выделившейся сейсмической энергии в квадратной ячейке с центром в эпицентре Хубсугульского землетрясения и со стороной  $2^\circ$  за 11 лет до него с временным шагом 1 год

Подобные расчеты, сделанные для всех 16 событий с  $K \geq 15$ , произошедших в БРЗ с 1963 по 2022 год, показали, что совокупность следующих признаков: наличие протяженного активного разлома, длительно существующей брешки, предшоковой активизации и длительного затишья — может служить весомым основанием для формализованного способа выделения мест ожидаемых землетрясений, а также для оценок энергии и времени возникновения сейсмического события. При этом среднее соотношение  $K_3 / K_{пр} = 1.18$  (0.01), а средняя длительность затишья  $T_{зтиш} = 5.7$  (3.4) лет, где в скобках указаны средние квадратичные отклонения. Видно, что разброс длительности затишья достаточно большой, поэтому для уточнения параметра «Т» необходимо привлекать дополнительную информацию.

*Работа подготовлена в рамках базового проекта «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии», № FWEF-2021-0009 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН по гранту № 075-15-2021-682.*

### *Литература*

- Левина Е.А.* Оперативная оценка распределения степени сейсмической опасности средствами ГИС // Геоинформатика. 2016. № 1. С. 3–8.
- Ружич В.В.* Сеймотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.
- Ружич В.В., Левина Е.А.* О разработке сейсмогеологического подхода к среднесрочному прогнозу землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Динамические процессы в геосферах. 2022. Т. 14. № 1. С. 17–28.
- Соболев Г.А.* Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН, 2011. 56 с.

### **FORMALIZATION OF IDENTIFICATION OF SOME SEISMOGEOLOGICAL SIGNS OF EARTHQUAKE PREPARATION BY THE EXAMPLE OF THE BAIKAL RIFTZONE**

Levina E.A., Ruzhich V.V.

*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, RAS, Irkutsk, Russia*

*E-mail: [levina@crust.irk.ru](mailto:levina@crust.irk.ru)*

УДК 553.078

## РАСПОЗНАВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ МЕСТ ЛОКАЛИЗАЦИИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ГОРНО-СКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЯХ РОССИИ НА ОСНОВЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Ливинский А.И., Горшков А.И., Новикова О.В.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

*E-mail: [artem@mitp.ru](mailto:artem@mitp.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** Рассматривается применимость формализованных методов для изучения условий локализации оруденения и идентификации рудоносных структур, которая отвечает современным задачам минерагенического прогнозирования, позволяя в единой системе анализировать широкий спектр эмпирических данных.

**Ключевые слова:** оруденение, методы распознавания образов, геолого-геофизические признаки

В работе рассматриваются три региона – Алтай-Саянский горноскладчатый комплекс, Кавказский регион и Кольский полуостров, в которых известно достаточно большое количество рудных месторождений разных размеров. Цель работы – определение потенциальных мест локализации месторождений металлов на основе определения характерных геолого-геофизических признаков с помощью методов распознавания образов. В металлогенических исследованиях весьма широко распространена информация о том, что местоположение рудных месторождений контролируется узлами пересечения линеаментов [Лопатин, 2002; Перцов и др., 1994; 2002]. На этой идее базируется данное исследование, которое развивает подход, заложенный в работах [Горшков, Соловьев, 2004; 2006], где для выделения рудоносных узлов пересечения линеаментов в горных поясах Средиземноморья были использованы методы распознавания образов. Задача решалась с помощью алгоритмов распознавания образов на основе схем линеаментно-блокового строения, составленных методом морфоструктурного районирования (МСР) с использованием данных дистанционного зондирования Земли [Раницман, 1979; Гвишиани и др., 1988].

Исследование включало два этапа. На первом этапе было проанализировано положение месторождений металлов в линеаментно-блоковой структуре исследуемого региона. В Алтай-Саянском регионе исследования проводились с использованием информации из базы данных ГГМ РАН им. В.И. Вернадского о крупных и суперкрупных месторождений металлов [Рундквист, 2004; Mineral..., 2000]. Для Кавказа и Кольского полуострова была использована та же база данных, но рассматривались месторождения разных размеров. Анализ пространственного положения относительно узлов пересечения линеаментов показал, что большинство месторождений локализованы в окрестностях (30 км

для Алтай-Саянского региона; 25 км для Кавказа и 20 км для Кольского полуострова) узлов пересечения линеаментов.

На втором этапе, используя методы распознавания образов, были определены характерные геолого-геофизические и геоморфологические признаки узлов, в окрестностях которых имеются месторождения. С их помощью были определены также потенциально рудоносные узлы в каждом регионе. Характерные признаки представлены интервалами численных значений использованных параметров, и для каждого региона они свои.

Параметры узлов, использованные при распознавании, содержали информацию трех типов:

- Информацию о контрастности и интенсивности тектонических движений на основе данных о высотах рельефа в узле, сочетаниях типов рельефа, площади молодых рыхлых отложений. Эти данные определяются по топографическим, геологическим и геоморфологическим картам.
- Параметры геометрии линеаментно-блокового строения региона, которые характеризуют раздробленность узлов. Эти параметры определяются непосредственно по картам МСР. К ним относятся сведения о числе и рангах тектонических зон, формирующих узел, о расстояниях до соседних узлов и границ блоков.
- Гравитационные и магнитные параметры, которые косвенно указывают на наличие глубинных неоднородностей в окрестностях узлов. Значения параметров были измерены с использованием базы данных ГЦ РАН.

Характерные геолого-геофизические и геоморфологические признаки рудоносных узлов определены с помощью алгоритма распознавания образов КОРА-3. На основе этих признаков алгоритм разделяет все множество узлов региона, установленных при МСР, на два класса:

- Класс Р, рудоносные узлы
- Класс НР, нерудоносные узлы

На этапе обучения алгоритм определил характерные признаки узлов класса Р и класса НР. При классификации к рудоносным узлам отнесены те, которые имеют больше Р-признаков, чем НР-признаков.

Для распознавания рудоносных узлов в Алтай-Саянском регионе рассматривались только крупные и суперкрупные месторождения металлов. Для обучения алгоритма все узлы были разделены на два класса: класс Р, куда вошли 22 узла, в 30-ти км окрестностях которых локализованы месторождения выбранного типа и размера, и класс НР, куда вошли 66 узлов, вблизи которых месторождения неизвестны. 7 узлов были отнесены к материалу экзамена. Результаты распознавания представлены на рис. 1.

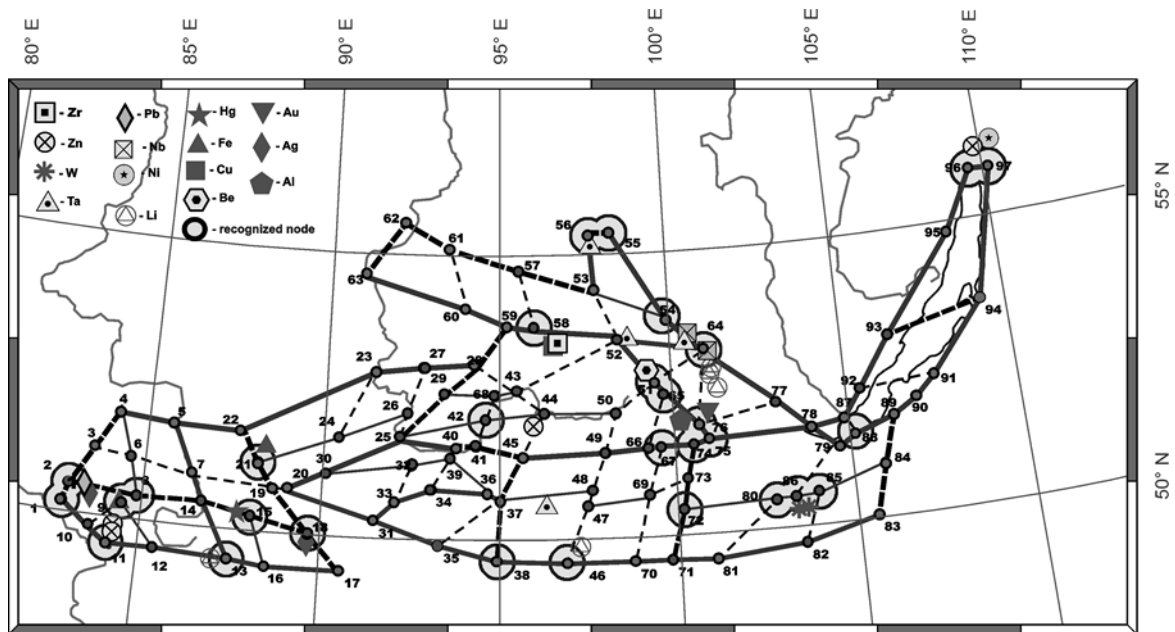


Рис. 1. Результат определения потенциальных мест локализации крупных и суперкрупных месторождений металлов в Алтай-Саянском регионе. Круги с выделенным контуром – узлы, распознанные как потенциально рудоносные

На Кавказе рассматривались разномасштабные месторождения – от малых и средних до крупных. В данном случае при обучении в класс Р вошли 27 узлов, в 25-ти км окрестностях которых известны месторождения разных размеров, в класс НР вошел 131 узел, в материалы экзамена были отнесены 35 узлов. Результаты представлены на рис. 2.

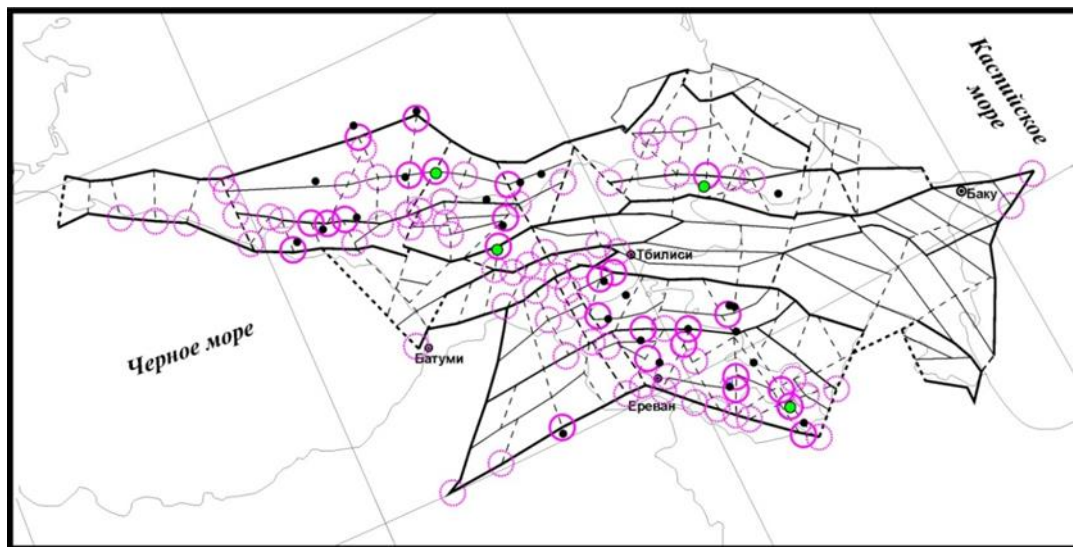


Рис. 2. Результаты распознавания мест локализации потенциально рудоносных узлов пересечения линейментов для Кавказа. Круги, выделенные ярко-розовым цветом, – узлы, которые вошли в материал обучения. Круги бледно-розового цвета – узлы, которые были распознаны алгоритмом как потенциально рудоносные

Для Кольского полуострова множество объектов распознавания составили 69 узлов. Материал обучения состоял из 7 узлов класса Р и 62 узлов класса НР (рис. 3).

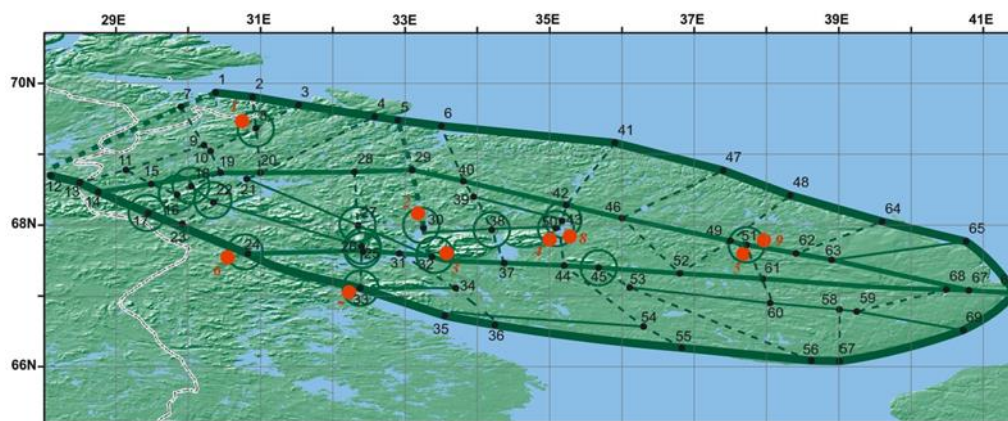


Рис. 3. Результат распознавания для Кольского полуострова. Зеленые круги – распознанные как потенциально рудоносные узлы

### Литература

- Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.А., Систернас А., Соловьев А.А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. 175 с.
- Горшков А.И., Соловьев А.А. Определение характеристик рудоносных узлов методами распознавания образов // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С. 381–390.
- Горшков А.И., Соловьев А.А. Распознавание облика рудных месторождений в поясе Тетис // Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. В трех томах. Том. 1. Глобальные закономерности размещения (ред. Д.В. Рундквист). М.: ИГЕМ РАН, 2006. С. 361–374.
- Лопатин Д.В. Линеаментная тектоника и месторождения-гиганты Северной Евразии // Исследование Земли из космоса. 2002. № 2. С. 77–91.
- Перцов А.В., Антипов В.С., Гальперов Г.В., Турченко С.И. Линеаментная сеть, контролирующая размещение суперкрупных месторождений России // Доклады РАН. 2002. Т. 383. № 1. С. 87–89.
- Перцов А.В., Гальперов Г.В., Смирнова Т.Н., Антипов В.С. Прогнозно-поисковые модели крупнейших рудных объектов на основе материалов дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 1994. № 6. С. 96–107.
- Ранцман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука, 1979. 170 с.
- Рундквист Д.В., Ткачев А.В., Черкасов С.В., Гатинский Ю.Г., Вишневецкая Н.А. База данных и металлогеническая карта крупных и суперкрупных месторождений мира: принципы составления и предварительный анализ результатов // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С. 391–422.
- Mineral atlas of the world. Geological survey of Norway, 2000. 400 p.

## RECOGNITION OF POTENTIAL LOCATIONS OF ORE DEPOSITS IN THE MOUNTAINOUS-FOLDED REGIONS OF RUSSIA BASED ON GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL DATA

Livinskiy A.I., Gorshkov A.I., Novikova O.V.

*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

*E-mail: [artem@mail.ru](mailto:artem@mail.ru)*



УДК 551.24

## РАЗРУШЕНИЕ ЛЕДНИКОВ АНТАРКТИДЫ, АКТИВИЗАЦИЯ ПОДЛЕДНОГО ВУЛКАНИЗМА И ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ МОРЯ – КАК ВОЗМОЖНОЕ СЛЕДСТВИЕ ТРИГГЕРНОГО ЭФФЕКТА ОТ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЛН СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ ЮГА ТИХОГО ОКЕАНА

Лобковский Л.И.<sup>1</sup>, Баранов А.А.<sup>2</sup>, Рамазанов М.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

E-mail: [aabaranov@gmail.com](mailto:aabaranov@gmail.com)

(устный доклад)

**Аннотация.** Интенсивное разрушение ледников в Антарктике в последние годы представляет серьезную опасность и является вызовом для цивилизации, поскольку потенциально может привести к подъему уровня Мирового океана на несколько десятков сантиметров уже в 21 веке. Причем не за счет медленного таяния ледников, а за счет сползания больших масс льда с коренного ложа в океан. При этом произойдет вытеснение огромного количества воды, что вызовет цунами и глобальное повышение уровня моря. Наиболее опасными считаются ледники Судного дня (Туэйтс) и Пайн-Айленд. Их потенциальный вклад в глобальное повышение уровня моря составляет около 65 и 50 см соответственно.

**Ключевые слова:** Антарктида, ледник Судного Дня, повышение уровня моря, глобальное потепление климата, триггерный механизм, деформационные волны

Геологические и геодинамические процессы в Земле происходят очень медленно на временах в миллионы лет. Между тем глобальное потепление климата происходит за десятилетия и продолжается в настоящее время. Полярные области Земли испытывают самое резкое и значительное потепление. В Арктике и Антарктике уменьшается площадь морского льда, на мелководном российском арктическом шельфе выделяется большое количество метана при разрушении структуры мерзлых пород и метастабильных газгидратов [Lobkovsky, 2020]. В Антарктиде происходит ускоренное разрушение шельфовых ледников [Lobkovsky et al., 2022], а покровные ледники увеличивают скорость стекания в океан [Rignot, 2019]. Все эти процессы обладают положительной обратной связью с потеплением климата, т. к. лед и снег хорошо отражают солнечные лучи, а метан в атмосфере обладает сильным парниковым эффектом. Процесс таяния больших масс льда растянут на десятилетия-столетия и приводит к медленному повышению уровня моря (миллиметры в год), что дает возможность человечеству время для маневра и адаптации. Однако потенциально существует быстрый процесс повышения уровня моря за очень короткое время при быстром сползании больших масс покровных ледников Антарктиды в море. Это может привести к катастрофическому поднятию уровня моря на десятки сантиметров и даже первые метры

с затоплением огромных площадей суши. Кроме того, при обрушении больших масс льда в море могут возникнуть мощные цунами. В настоящей работе на основе двумерной модели движения неоднородной массы льда по коренному ложу приводятся оценки скорости стекания ледников в океан при различных условиях, отвечающих прилипанию к ложу или скольжению ледника под действием силы тяжести.

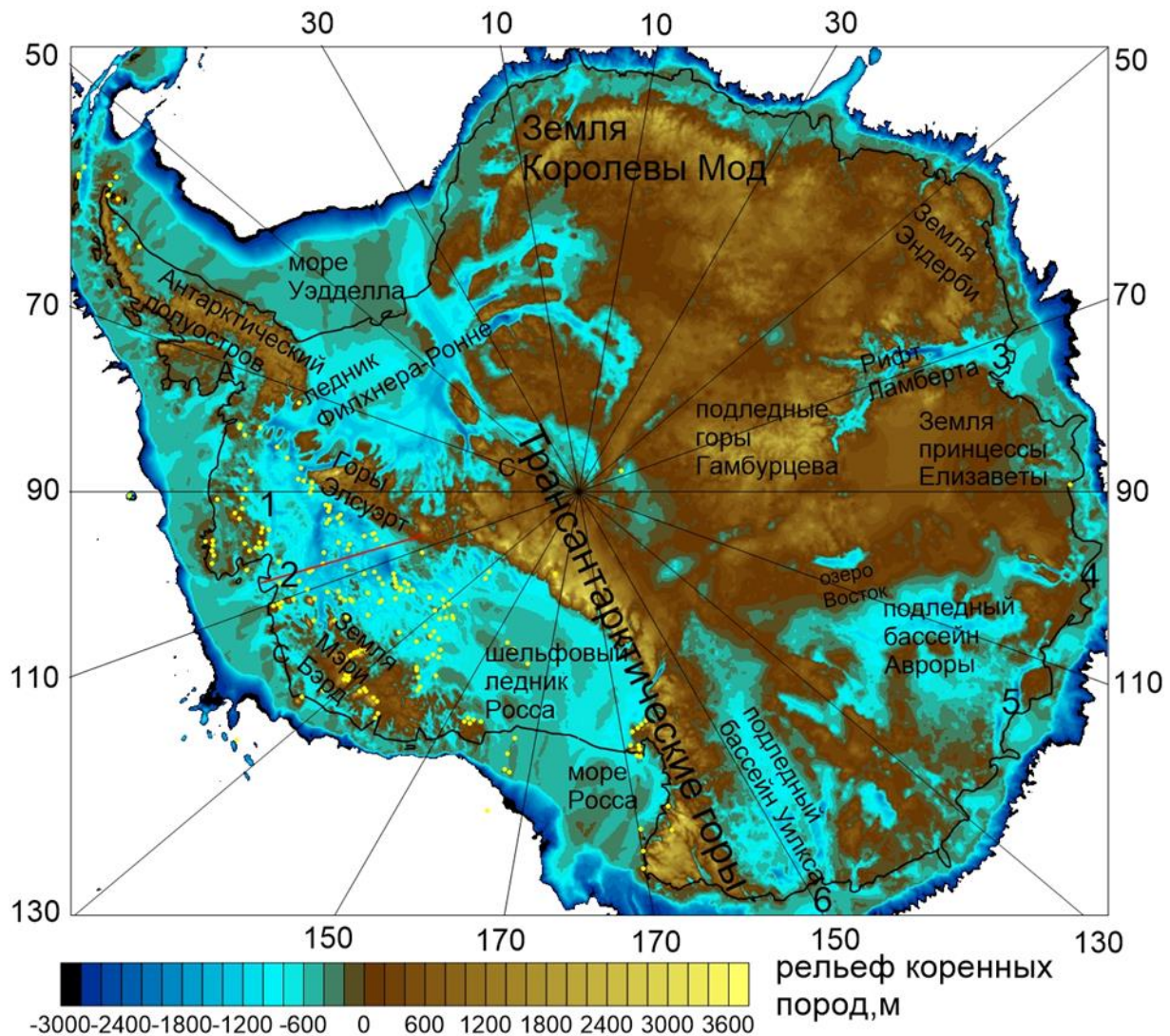


Рис. 1. Рельеф коренных пород Антарктиды по модели BEDMACHINE [Morlighem et al., 2020]. Красная линия – профиль от гор Элсуэрт до ледника Туэйтса. Вулканы отмечены желтыми точками. Цифрами отмечены быстродвижущиеся ледники: 1 – Пайн-Айленд; 2 – Туэйтс; 3 – Ламберт; 4 – Скотт и Денмен; 5 – Вендерфорт и Тоттен; 6 – Уилкса

В Антарктическом ледяном щите содержится около 61% всей пресной воды на Земле (~26.5 млн км<sup>3</sup> льда), что эквивалентно ~58 м уровня Мирового океана. При этом вклад всего льда Западной Антарктиды в повышение уровня моря составляет около 5 метров. Динамика движения и таяния ледников Антарктиды определяется множеством факторов: рельефом, реологией, температурой коренного ложа, граничными условиями сбоку, сверху и т. д.

Для Западно-Антарктической рифтовой системы характерен повышенный тепловой поток [Löising et al., 2020], обнаружено около 100 активных вулканов, в том числе подледных

[van Wyk de Vries et al., 2018], коренные породы находятся в основном ниже уровня моря (рис. 1).

На рис. 1 цифрами обозначены наиболее быстро стекающие покровные ледники и их потенциальный вклад в повышение уровня моря: Пайн-Айленд (50 см), Туэйтс (65 см), Амери (777 см), Денмен (149 см), Тоттен (385 см), Уилкса (158 см). Основные потери льда в последние десятилетия ассоциируются именно с этими ледниками [Rignot et al., 2019].

Оценка скорости стекания ледовой массы по коренному ложу в океан проводится на основе двумерной модели вдоль профиля от гор Элсуэрт до границы ледника Туэйтс (рис. 2). Следует отметить важную особенность данного профиля. При подходе к берегу подледный рельеф резко выполаживается. Объяснение этого феномена Антарктиды связано с позднекайнозойской активизацией рифтогенеза уже после оледенения континента [Баранов и др., 2022; 2023]. Уникальность ситуации для ледяного континента заключается в том, что после оледенения происходит прекращение осадконакопления. Продолжение рифтогенеза в этих условиях приводит к формированию глубоких подледных впадин, заполненных льдом. У берега же происходит периодическая регрессия-трансгрессия моря. В период таяния льда возобновляется осадконакопление, а внутри континента этого не происходит. Поднятие дна при подходе к берегу тормозит стекание ледника, поэтому при отступлении зоны заземления вглубь континента сечение стока будет увеличиваться и ледник ускоряться. Таким образом, при отступлении ледника возникает положительная обратная связь. Это характерно для наиболее нестабильных и быстро стекающих ледников 1–6 (рис. 1).

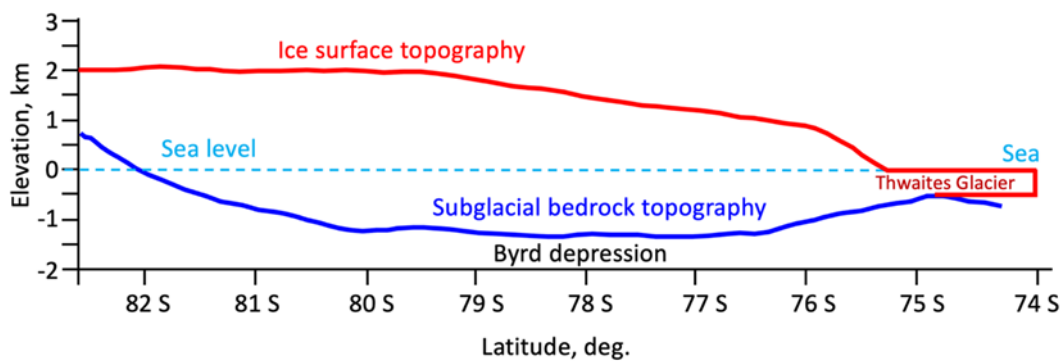


Рис. 2. Профили коренной породы и топографии льда от гор Элсуэрта до береговой линии ледника Туэйтс

Уравнения двухмерного движения льда с реологией Глена при  $n = 3$  можно записать в виде [Pattyn, 2017]:

$$2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \eta \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \eta \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho_i g = 0$$

$$\eta = \frac{A^{-1/3}}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]^{-1/3} \quad (1)$$

Используя кулоновский закон трения и выражение для вязкости (1), можно получить оценку

$$\gamma \sim 5 \frac{10^4}{h \mu^3} \left( \frac{h}{L} \right)^3$$

Рассмотрим следующие значения параметров исходя из рис. 1:

$$L \sim 8 \cdot 10^5, \quad \rho_i \approx 900, \quad T = 263$$

$$E_f = 1, \quad \mu = 0.5$$

Оценки характерных скоростей проводились для двух разных толщин ледника. Результаты приведены в таблице:

	прилипание	скольжение
$h = 3000$	22.7 м/год	$3.2 \cdot 10^3$ м/год
$h = 3500$	66.7 м/год	$6.0 \cdot 10^3$ м/год

Рассматриваемая модель показывает, как растекается громадная масса льда толщиной более 2 км в гравитационной линзе центральной части Западной Антарктиды, выдавливаясь через щель около 500 м в море. По мере их отступления щель будет увеличиваться, т. к. рельеф коренных пород углубляется, и таким образом, стекание льда может ускоряться. При растекании огромной массы льда в центральной части Западной Антарктиды скорости потока равны десяткам метров в год в случае прилипания к ложу ледника и достигают километров в год в условиях скольжения. В настоящее время для ледников Туэйтса и Пайн-Айленд характерны преимущественно условия скольжения на нижней границе со скоростью течения льда в километры в год.

Как отмечалось выше, основным фактором, способствующим скольжению ледникового покрова, является увеличение теплового потока в Западной Антарктиде, что создает возможность таяния льда у подножия ледника. Однако процесс плавления

происходит неравномерно во времени и пространстве. Согласно концепции сейсмогенного триггера, таяние начинается в определенных областях подножия ледника, где активируются подледные вулканы за счет прихода деформационных волн от очагов сильнейших землетрясений, окружающих Антарктиду. Подобные ускорения ледника Туэйтс имели место и ранее [Mackintosh, 2022].

Полученные выше характерные скорости движения покровных ледников качественно согласуются с наблюдаемыми данными. Такие ускорения ледников на фоне повышенного теплового потока могут происходить не из-за антропогенного фактора, а за счет триггерного эффекта активизации подледных вулканов, вызванного деформационными волнами, приходящими в Западную Антарктику, от сильнейших землетрясений в зонах субдукции, окружающих Антарктиду [Lobkovsky, 2022]. Это может привести к быстрому сползанию громадных масс покровных ледников в море (например, ледник Судного Дня) и глобальному повышению уровня Мирового океана на несколько десятков сантиметров и даже первые метры.

Представленная модель динамики ледников требует дальнейших уточнений. В частности, в нашей модели не учтена трехмерность модели растекания ледового щита. Необходимы более точные расчеты динамики ледников с учетом их трехмерной геометрии, реологии льда и ложа ледника.

*Работа выполнена частично в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН № FMWE-2021-0004 и частично в рамках госзадания Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН № АААА-А19-119011490131-3.*

### **Литература**

- Баранов А.А., Бобров А.М., Чуваев А.В. Глубочайшие впадины на суше - новые данные и возможный механизм их образования // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2022: Материалы ЛПТ Тектонического совещания. Москва: Издательство ГЕОС, 2022. С. 40–43.
- Баранов А.А., Лобковский Л.И., Бобров А.М. Глобальная геодинамическая модель современной Земли и ее приложение для Антарктиды // Доклады Академии наук. 2023. Т. 512. № 1. С. 100–105.
- Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Ramazanov M.M., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Semiletov I.P., Alekseev D.A. Trigger Mechanisms of Gas Hydrate Decomposition, Methane Emissions, and Glacier Breakups in Polar Regions as a Result of Tectonic Wave Deformation // Geosciences. 2022. V. 12. № 10. Article 372. DOI:[10.3390/geosciences12100372](https://doi.org/10.3390/geosciences12100372)
- Lobkovsky L.I. Seismogenic-triggering mechanism of gas emission activations on the Arctic shelf and associated phases of abrupt warming // Geosciences. 2020. V. 10. № 11. Article 428. DOI:[10.3390/geosciences10110428](https://doi.org/10.3390/geosciences10110428)
- Lösing M., Ebbing J., Szwillus W. Geothermal heat flux in Antarctica: Assessing models and observations by Bayesian inversion // Frontiers in Earth Science. 2020. V. 8. Article 105. DOI:[10.3389/feart.2020.00105](https://doi.org/10.3389/feart.2020.00105)

- Mackintosh A.* Thwaites Glacier and the bed beneath // *Natural Geoscience*. 2022. V. 15. P. 687–688. DOI:[10.1038/s41561-022-01020-2](https://doi.org/10.1038/s41561-022-01020-2)
- Morlighem M., Rignot E., Binder T., Blankenship D., Drews R., Eagles G., Eisen O., Ferraccioli F., Forsberg R., Fretwell P. et al.* Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet // *Natural Geoscience*. 2020. V. 13. P. 132–137. DOI:[10.1038/s41561-019-0510-8](https://doi.org/10.1038/s41561-019-0510-8)
- Pattyn F.* Sea-level response to melting of Antarctic ice shelves on multi-centennial timescales with the fast Elementary Thermomechanical Ice Sheet model (f.ETISh v1.0) // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. No 4. P. 1851–1878. DOI:[10.5194/tc-11-1851-2017](https://doi.org/10.5194/tc-11-1851-2017)
- Rignot E., Mouginot J., Scheuchl B., van den Broeke M., van Wessem M.J., Morlighem M.* Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017 // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2019. V. 116. No 4. P. 1095–1103. DOI:[10.1073/pnas.1812883116](https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116)
- van Wyk de Vries M., Bingham R., Hein A.* A new volcanic province: an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica // *Geol. Soc. Spec. Publ.* 2018. V. 461(1). P. 231–248. DOI:[10.1144/sp461.7](https://doi.org/10.1144/sp461.7)

**SEISMOGENIC TRIGGER MECHANISM OF RAPID CLIMATE WARMING  
IN THE ARCTIC AND ACCELERATION OF GLACIER MOVEMENT  
IN THE ANTARCTIC, BASED ON DEFORMATION WAVES FROM LARGE  
EARTHQUAKES IN SUBDUCTION ZONES**

Lobkovsky L.I.<sup>1</sup>, Baranov A.A.<sup>2</sup>, Ramazanov M.M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

*E-mail: [aabaranov@gmail.com](mailto:aabaranov@gmail.com)*

УДК 550.34

## АНАЛИЗ ГЛОБАЛЬНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В СВЯЗИ С СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

Любушин А.А.<sup>1</sup>, Родионов Е.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия

E-mail: [lyubushin@yandex.ru](mailto:lyubushin@yandex.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** С помощью параметрической модели взаимодействия 2-х точечных процессов произведен анализ связи между максимальными когерентностями между корреляциями глобального магнитного поля и длиной суток и сильнейшими землетрясениями мира.

**Ключевые слова:** магнитное поле Земли, сейсмические события, вейвлеты, корреляция, когерентность, взаимодействующие точечные процессы, неравномерность вращения Земли

Анализируются данные трёхкомпонентных измерений напряженности магнитного поля Земли на 153 станциях сети INTERMAGNET (<https://intermagnet.org/>) с шагом по времени 1 минута для наблюдений в течение 31 года, 1991–2021 гг. (рис. 1).

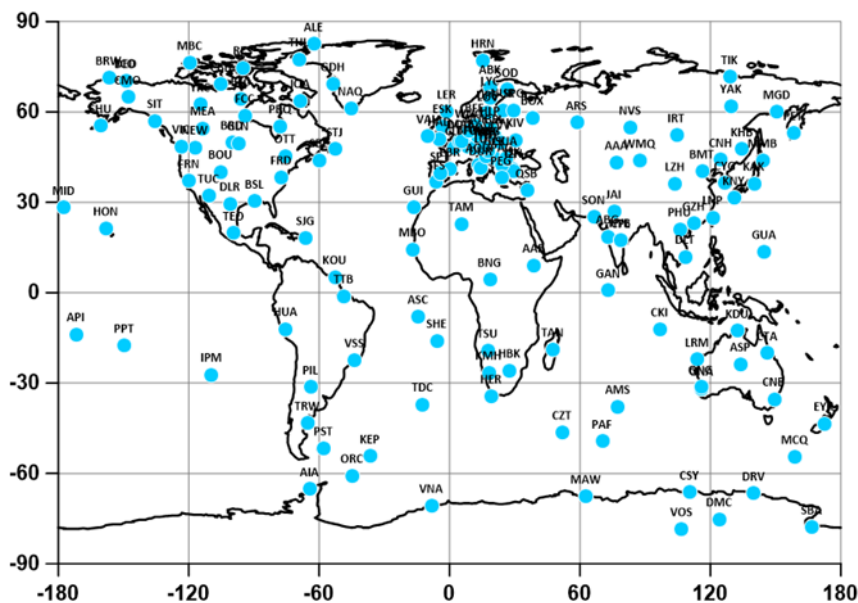


Рис. 1. Положения 153 станций сети INTERMAGNET показаны голубыми точками, рядом с которыми указаны их идентификаторы

Целью анализа является оценка глобальных корреляций вариаций магнитного поля в последовательных временных окнах длиной 1440 минут (1 сутки) и проверка гипотез о триггерном влиянии всплесков корреляции магнитного поля на последовательность сильных землетрясений. Для получения оценок корреляции используется разложение по ортогональным вейвлетам Добеши Db03 с тремя обнуляемыми моментами [Mallat, 1999]. Вейвлет Db03 выбран путем перебора базисов с числом обнуляемых моментов от 1 до 10

как реализующий минимум энтропии распределения квадратов вейвлет-коэффициентов в наибольшем числе случаев для последовательности интервалов длиной 1 сутки. Вейвлет-коэффициенты вычислялись в последовательных временных окнах длиной 1 сутки для первых 7 уровней детальности вейвлет-разложения. Последний, 7-ой уровень детальности, соответствует периодам от 128 до 256 минут. На каждом уровне детальности в каждом временном окне вычислялись абсолютные значения парных коэффициентов корреляции между вейвлет-коэффициентами для каждой станции, которые затем усреднялись. Затем бралось максимальное значение по всем 7 уровням детальности. Далее из этих максимальных значений, вычисленных для трех компонент магнитного поля, выбирались максимумы. Результирующий график всех операций взятия максимумов корреляций представлен на рис. 2.

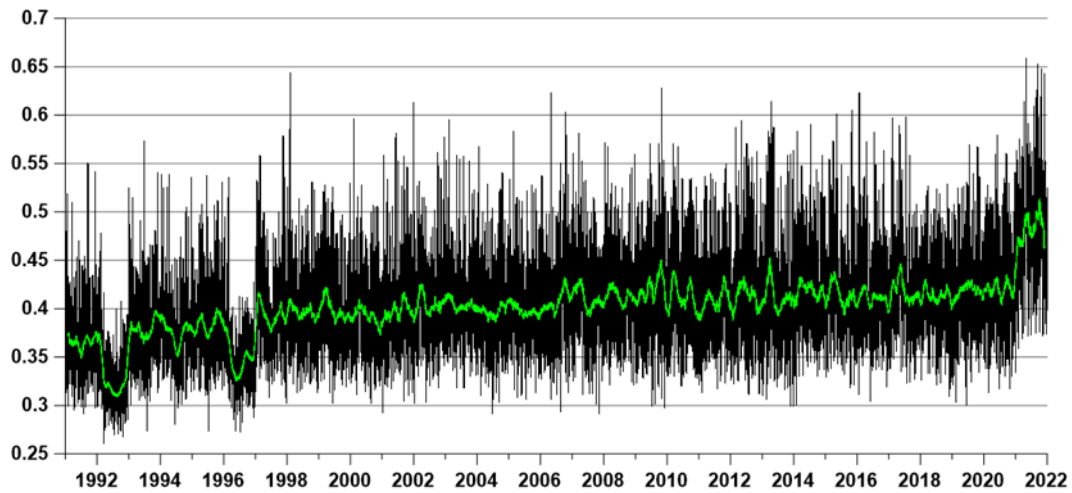


Рис. 2. Максимальные ежесуточные вейвлет-корреляции всех 3-х компонент магнитного поля. Зеленой линией показано скользящее среднее в окне длиной 57 суток

Применяется метод матриц влияния, который был использован в [Lyubushin, 2022] для анализа связей между локальными экстремумами средних значений свойств сейсмического шума и сильнейшими землетрясениями.

Пусть  $t_j^{(\alpha)}$ ,  $j=1, \dots, N_\alpha$ ;  $\alpha=1, 2$  представляют собой моменты времен 2-х потоков событий. Представим их интенсивности в виде  $\lambda^{(\alpha)}(t) = b_0^{(\alpha)} + \sum_{\beta=1}^2 b_\beta^{(\alpha)} \cdot g^{(\beta)}(t)$ , где  $b_0^{(\alpha)} \geq 0, b_\beta^{(\alpha)} \geq 0$  – параметры,  $g^{(\beta)}(t)$  – функция влияния событий  $t_j^{(\beta)}$  потока с номером  $\beta$ :  $g^{(\beta)}(t) = \sum_{t_j^{(\beta)} < t} \exp(-(t - t_j^{(\beta)}) / \tau)$ . Согласно этой формуле вес события с номером  $j$  становится ненулевым для времен  $t > t_j^{(\beta)}$  и затухает с характерным временем  $\tau$ .



Зафиксируем параметр  $\tau$  и рассмотрим задачу определения параметров  $b_0^{(\alpha)}$ ,  $b_\beta^{(\alpha)}$ .

Логарифмическая функция правдоподобия для нестационарного пуассоновского процесса

равна на интервале времени  $[0, T]$  [Cox, Lewis, 1966]  $\ln(L_\alpha) = \sum_{j=1}^{N_\alpha} \ln(\lambda^{(\alpha)}(t_j^{(\alpha)})) - \int_0^T \lambda^{(\alpha)}(s) ds$ .

Задача максимизации функции  $\ln(L_\alpha)$  приводится [Lyubushin, 2022] к задаче на поиск максимума:

$$\Phi^{(\alpha)}(b_1^{(\alpha)}, b_2^{(\alpha)}) = \sum_{j=1}^{N_\alpha} \ln(\lambda_0^{(\alpha)} + \sum_{\beta=1}^2 b_\beta^{(\alpha)} \cdot \Delta g^{(\beta)}(t_j^{(\alpha)})) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $\Delta g^{(\beta)}(t) = g^{(\beta)}(t) - \bar{g}^{(\beta)}$ ,  $\bar{g}^{(\beta)} = \int_0^T g^{(\beta)}(s) ds / T$  при ограничениях  $b_1^{(\alpha)} \geq 0$ ,  $b_2^{(\alpha)} \geq 0$ ,

$\sum_{\beta=1}^2 b_\beta^{(\alpha)} \bar{g}^{(\beta)} \leq \lambda_0^{(\alpha)}$ , где  $\lambda_0^{(\alpha)} = N_\alpha / T$ . Решив численно задачу (1) для заданного  $\tau$ , можно

ввести элементы матрицы влияния  $\kappa_\beta^{(\alpha)}$ ,  $\alpha = 1, 2$ ;  $\beta = 0, 1, 2$  согласно формулам:

$$\kappa_0^{(\alpha)} = \frac{b_0^{(\alpha)}}{\lambda_0^{(\alpha)}} \geq 0, \quad \kappa_\beta^{(\alpha)} = \frac{b_\beta^{(\alpha)} \cdot \bar{g}^{(\beta)}}{\lambda_0^{(\alpha)}} \geq 0. \quad (2)$$

Величина  $\kappa_0^{(\alpha)}$  является частью средней интенсивности  $\lambda_0^{(\alpha)}$  процесса с номером  $\alpha$ , являющейся чисто стохастической, часть  $\kappa_\alpha^{(\alpha)}$  вызвана влиянием самовозбуждения  $\alpha \rightarrow \alpha$  и

$\kappa_\beta^{(\alpha)}$ ,  $\beta \neq \alpha$  обусловлена внешним влиянием  $\beta \rightarrow \alpha$ . Из формулы (2) вытекает условие нормировки  $\kappa_0^{(\alpha)} + \sum_{\beta=1}^2 \kappa_\beta^{(\alpha)} = 1$ ,  $\alpha = 1, 2$ . В результате можно определить матрицу влияния:

$$\left( \begin{array}{c|cc} \kappa_0^{(1)} & \kappa_1^{(1)} & \kappa_2^{(1)} \\ \hline \kappa_0^{(2)} & \kappa_1^{(2)} & \kappa_2^{(2)} \end{array} \right). \quad (3)$$

Первый столбец матрицы (3) составлен из долей Пуассона средних интенсивностей.

Диагональные элементы правой подматрицы размера  $2 \times 2$  состоят из самовозбуждающихся элементов средней интенсивности, тогда как недиагональные элементы соответствуют взаимному возбуждению. Суммы составляющих строк матрицы влияния (3) равны 1. Матрицы влияния оцениваются в некотором скользящем временном окне длиной  $L$  со смещением  $\Delta L$  и с заданным значением параметра затухания  $\tau$ .

Целью дальнейшего анализа является исследование связи между откликом корреляций магнитного поля на неравномерность вращения Земли и последовательностью землетрясений с магнитудой не ниже 7. Под откликом понимается максимальная квадратичная когерентность между длиной суток (неравномерностью вращения Земли) и ежесуточными максимальными вейвлет-корреляциями (рис. 2), вычисляемая в скользящем временном окне длиной 365 суток со смещением 3 суток с помощью модели авторегрессии 5-го порядка. Метод вычисления отклика на LOD подробно изложен в [Lyubushin, 2021;

2022]. Метод матриц влияния дает возможность вычислять корреляции между последовательностями сейсмических событий и откликом магнитного поля на неравномерность вращения Земли. Сравняются моменты времени 467 землетрясений с магнитудой не ниже 7 и моменты времени достижения 467 наибольших локальных максимумов отклика на LOD. Графики этих временных рядов представлены на рис. 3.

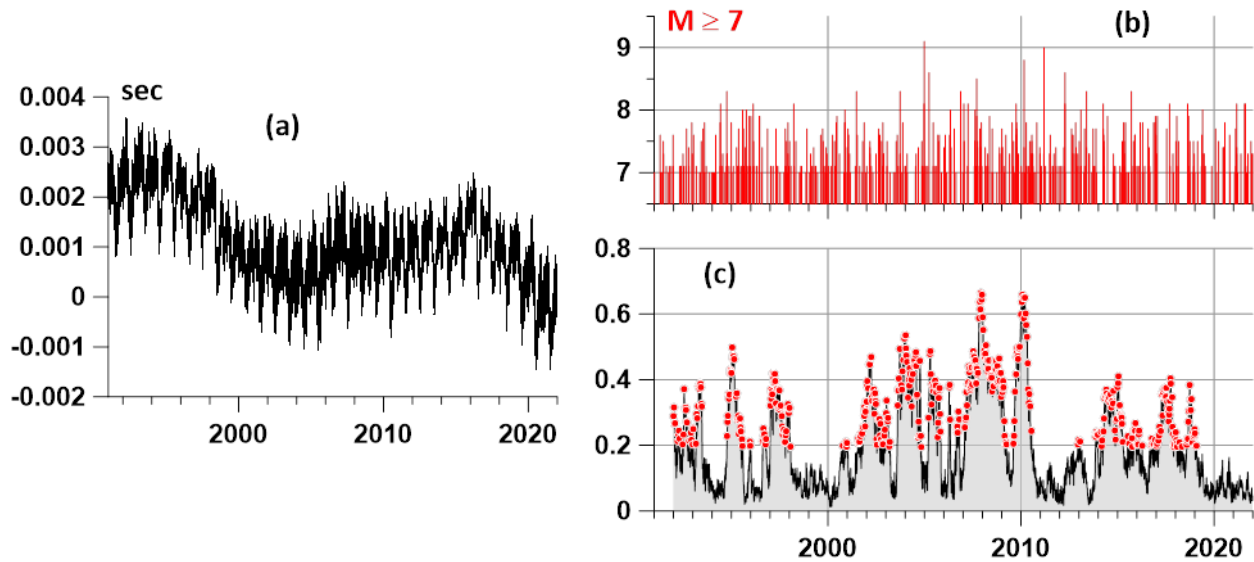


Рис. 3. (а) – график длины суток (<https://hpiers.obspm.fr/iers/eop/eopc04/eopc04.1962-now>); (b) – последовательность 467 землетрясений с магнитудой не ниже 7 для интервала времени 1991–2022 гг. (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>); (c) – отклик максимальных вейвлет-корреляций магнитного поля на неравномерность вращения Земли, красными точками помечены моменты времени 467 наибольших локальных максимумов отклика в зависимости от правого конца временного окна

Расчеты проводились для 100 значений длин временных окон в промежутке от 3 до 7 лет со смещением 0.05 года для времени релаксации  $\tau$  0.25 года. Для каждой длины временного окна выделим моменты времени, соответствующие локальным максимумам компоненты матрицы влияния (один из недиагональных элементов правой подматрицы размером  $2 \times 2$  в матрице (3)), соответствующей влиянию откликов корреляций на длину суток на времена землетрясений при смещении временного окна по оси времени. Результат показан на рис. 4 для двух вариантов выбора локальных максимумов: (а) при использовании всех локальных максимумов в каждом временном окне и (b) при использовании 32 наибольших локальных максимумов. Вертикальные красные линии на рис. 4 соответствуют последовательности 6 сильнейших землетрясений: 2004.12.26, Суматра,  $M = 9.1$ ; 2005.03.28, Суматра,  $M = 8.6$ ; 2007.09.12, Суматра,  $M = 8.5$ ; 2010.02.27, Чили,  $M = 8.8$ ; 2011.03.11, Тохоку,  $M = 9.0$ ; 2012.04.11, Суматра,  $M = 8.6$ .

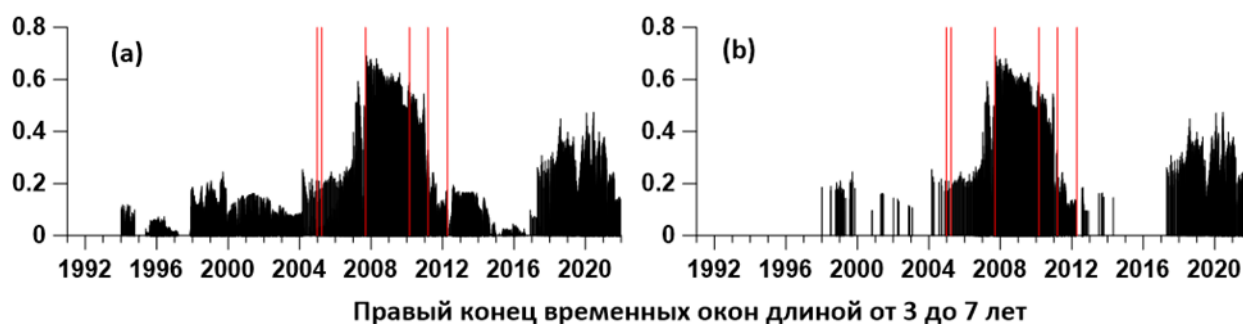


Рис. 4. Моменты и величины локальных максимумов матриц влияния в скользящих временных окнах длиной от 3 до 7 лет со сдвигом 0.05 лет, время релаксации 0.25 года. Вертикальные красные линии соответствуют времени мега-землетрясений с магнитудой не ниже 8.5. График (а) соответствует использованию всех локальных максимумов компоненты матриц влияния, тогда как график (б) соответствует использованию 32 максимальных локальных максимумов в каждом временном окне

**Выводы.** Установлено, что отклик максимальных корреляций магнитного поля на неравномерность вращения Земли при оценке матриц влияния для последовательностей скользящих временных окон с длиной от 3 до 7 лет совпадает с интервалом времени землетрясений  $M \geq 8.5$ . Всплески компонент матриц влияния в 2018-2022 годах независимо подтверждают ранее сделанные выводы об увеличении текущей сейсмической опасности на основе анализа отклика свойств сейсмического шума на LOD [Lyubushin, 2022; 2023].

Работа выполнена в рамках государственного задания FMWU-2022-0018 Института физики Земли РАН.

### Литература

- Cox D.R., Lewis P.A.W. The statistical analysis of series of events. London, Methuen, 1966. 285 p.
- Lyubushin A. Low-Frequency Seismic Noise Properties in the Japanese Islands // Entropy. 2021. V. 23. No 4. Article 474. DOI:[10.3390/e23040474](https://doi.org/10.3390/e23040474)
- Lyubushin A. Investigation of the Global Seismic Noise Properties in Connection to Strong Earthquakes // Frontiers in Earth Science. 2022. V. 10. Article 905663. DOI:[10.3389/feart.2022.905663](https://doi.org/10.3389/feart.2022.905663)
- Lyubushin A. Spatial Correlations of Global Seismic Noise Properties // Applied Sciences. 2023. V. 13. No 12. Article 6958. DOI:[10.3390/app13126958](https://doi.org/10.3390/app13126958)
- Mallat S.A. Wavelet Tour of Signal Processing. 2nd edition. San Diego, London, Boston, New York, Sydney, Tokyo, Toronto: Academic Press, 1999. 620 p.

## ANALYSIS OF GLOBAL CORRELATIONS OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD IN CONNECTION WITH STRONG EARTHQUAKES

Lyubushin A.A.<sup>1</sup>, Rodionov E.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russia

E-mail: [lyubushin@yandex.ru](mailto:lyubushin@yandex.ru)

УДК 550.83.017

## ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ СЕЙСМОПЛОТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ

Мартышко П.С., Ладовский И.В., Цидаев А.Г., Бызов Д.Д.

*Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича УрО РАН, г. Екатеринбург,  
Россия*

*E-mail: [pmart3@mail.ru](mailto:pmart3@mail.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** Разработан метод, алгоритмы и компьютерные технологии для совместной интерпретации сейсмических и гравитационных данных. Выполнена переобработка сейсмических профилей ГСЗ методом двумерной сейсмической томографии, и построены градиентные скоростные разрезы земной коры в формате сеточных функций. В том же формате построены плотностные разрезы. Коэффициенты эмпирической зависимости «плотность–скорость» вычислялись с использованием алгоритма решения двумерной обратной задачи гравиметрии. Способ и технология расчета трехмерного распределения плотности с привязкой к двумерным данным по опорным сейсмическим разрезам заложены в методику количественной интерпретации потенциальных полей с построением объемных геофизических моделей. Устойчивое решение трехмерной обратной задачи гравиметрии определяется на множестве корректности семейства горизонтальных слоев с двумерным распределением плотности. С использованием устойчивых параллельных алгоритмов, реализованных на графических процессорах, построена трехмерная плотностная модель земной коры Среднего Урала и прилегающих регионов.

**Ключевые слова:** сейсмоплотностные модели земной коры, параллельные алгоритмы

Геолого-геофизические модели глубинного строения земной коры и верхней мантии (верхней части литосферы) являются итоговым результатом комплексной интерпретации всех имеющихся данных. При этом одним из основных индикаторов корректной реализации методики комплексирования геофизических полей служит плотность. Именно в ней наиболее полно отражаются петрофизические особенности неоднородного строения и литологического состава горных пород.

Известно, что в гравитационном поле наиболее четко проявляются аномалии от неоднородностей верхней части геологического разреза до глубины 10–15 км. Однако данные сейсмических зондирований убедительно свидетельствуют о неоднородном распределении скорости не только в земной коре, но и в подстилающих её верхах мантии. И вероятным плотностным аналогом скоростной модели глубинных структур будет компенсационная модель, когда аномалии гравитационного поля от неоднородных слоёв на разных глубинах будут частично (или полностью) скомпенсированы. Совместная интерпретация полей ведется в рамках эмпирических ограничений. Корреляционная зависимость между скоростью распространения продольных волн в неоднородной среде и плотностью пород различного вещественного состава предполагает ожидаемый результат

решения задачи сейсмоплотностного моделирования: в аномальных полях различной природы и информативности выявить морфоподобные структуры и обеспечить соответствие расчетных скоростных и плотностных параметров на разноглубинных срезах.

Информационную базу 3D-плотностной модели исследуемой территории составляют карты площадных аномалий гравитационного поля и данные глубинных сейсмических исследований по опорным профилям ГСЗ. Территория исследования находится в пределах географических координат  $56^{\circ}$ – $60^{\circ}$ с.ш.,  $54^{\circ}$ – $66^{\circ}$ в.д.

Опишем этапы построения сейсмоплотностной модели земной коры. Вычисляются значения скоростей и плотностей (с учетом зависимости скорость – плотность) вдоль профилей; уточняются 2D-плотностные разрезы по гравитационному полю (решается двумерная обратная задача); вычисляются плотности мантийных блоков из условия изостатической компенсации; получившиеся разрезы с привязкой к карте аномалий гравитационного поля размещаются в пространстве; выполняется интерполяция «двумерной» плотности в межпрофильное пространство: получаем 3D-плотностной «куб» интерполированных значений – модель начального приближения [Ладовский и др., 2016].

Далее выбираются параметры продолжения масс за пределы моделируемой области для минимизации граничных эффектов при решении прямой задачи гравиметрии; вычисляется поле модели начального приближения и начальная разность с наблюдаемым полем, полученную разность полей разделяем на составляющие, которые ставим в соответствие непересекающимся горизонтальным слоям модели с разной глубиной залегания; для каждого слоя решаем линейную обратную задачу гравиметрии и определяем поправку к плотностной модели начального приближения, которая минимизирует невязку модельного и наблюдаемого полей.

Таким образом, двумерные скоростные и соответствующие им плотностные разрезы по сейсмическим профилям [Мартышко и др., 2016а] формируют исходную базу данных трехмерной плотностной модели начального приближения. Недостающие данные по плотностям восполняются интерполированными значениями между пространственно увязанными разрезами.

Аномальные гравитационные эффекты вычисляются на уровне фонового поля «нормальной» модели. В качестве фоновой плотности «нормальной» модели плоского слоя принимается плотность, зависящая только от глубины. Такую плотность условно можно назвать «гидростатической», относительно нее вычисляется избыточная плотность аномальных масс на любой глубине.

Процесс построения плотностных моделей сводится к решению обратной задачи гравиметрии. Ее решение следует искать на практически содержательных множествах

корректности, выбирая разумные модели начального приближения. Послойное распределение скорости в формате сеточных функций (с учетом зависимости «плотность – скорость») идеально подходит для плотностной модели начального приближения, обеспечивая устойчивость обратной задачи гравиметрии в классе слабоединственных решений для моделей слоисто-неоднородных сред [Мартышко и др., 2016б]. Устойчивый алгоритм послойной линейной инверсии реализован в классе двумерных корректирующих добавок с нулевым средним значением. Итеративная последовательная схема вычислений корректирующих добавок по горизонтальным слоям не только обеспечивает единственность решения обратной задачи гравиметрии, но и сохраняет геологическую содержательность исходной скоростной модели, построенной по сейсмогеологическим данным [Мартышко и др., 2013].

Представление выходного формата трехмерной плотностной модели в виде послойных сеточных функций дает возможность переходить к сканированию структурного рельефа вещественных комплексов земной коры по значениям параметра плотности в некотором диапазоне значений.

Аномалии гравитационного поля, заданные на дневной поверхности, отражают информацию о плотностных неоднородностях по всей толще нижележащих слоев. Тектонические схемы не просматриваются в послойной модели распределения плотности. Интегральные плотностные параметры – массы столбцов единичной площади, вычисленные до некоторой глубины по послойным сеточным файлам трехмерного распределения плотности, отчетливо конфигурируют блочную модель кристаллической земной коры на разных глубинных срезах. Та же картина проявляется в аномальных полях литостатических нагрузок. Литостатические аномалии пропорциональны избыточной плотности, так что 3D-плотностная модель легко перестраивается в 3D-модель аномалий литостатического давления путем последовательного суммирования послойных сеточных плотностных файлов до заданной глубины и перенормировкой интегральных масс в литостатическое давление вышележащих слоев. Распределение литостатических нагрузок на горизонтальных срезах неплохо соответствует схематической карте тектонического районирования, построенной по потенциальным полям. Предлагаемая методика и полученные нами «блочные схемы» распределения литостатических нагрузок по глубине использованы для разделения сеточной плотностной модели на разнопорядковые структурные элементы глубинного тектонического районирования.

На рис. 1 показаны субгоризонтальные изоплотностные границы, построенные по плотностной модели, и значения литостатических аномалий на этих границах (срезы литостатической модели по границам).

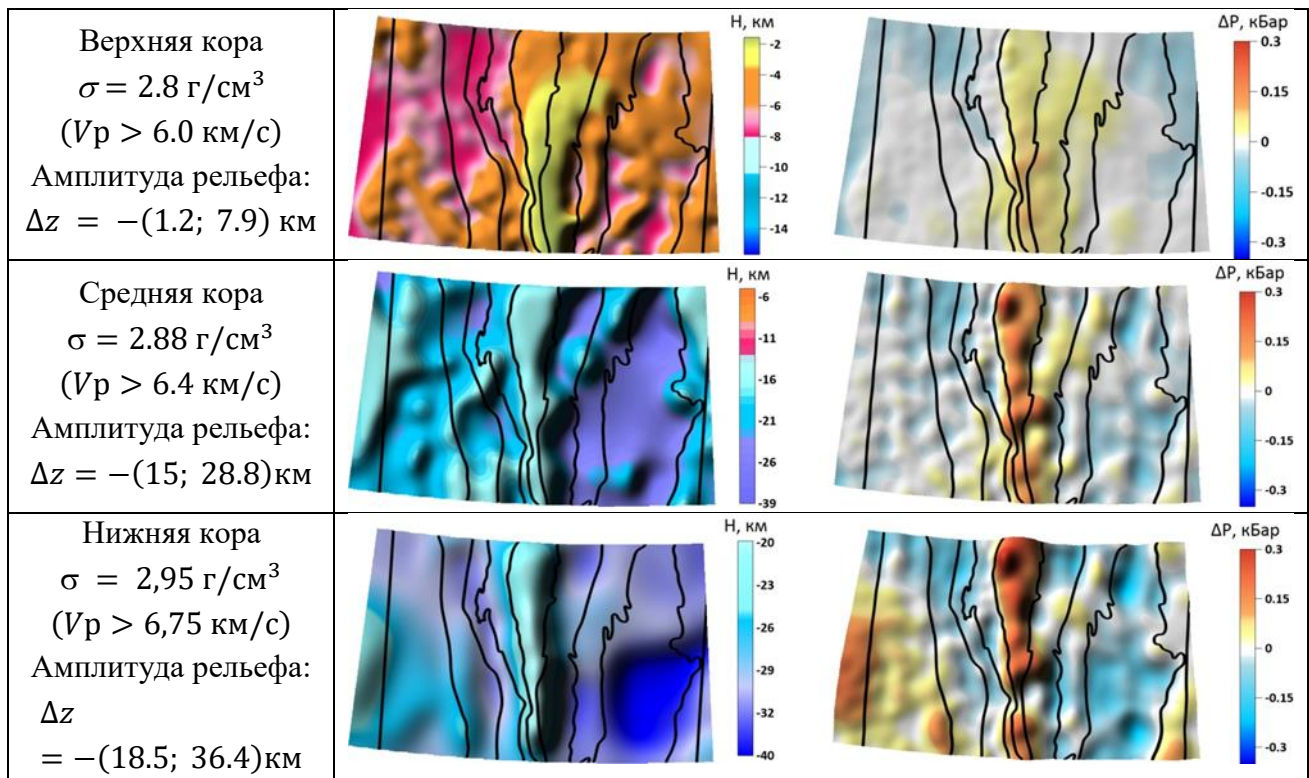


Рис. 1. Субгоризонтальные изоплотностные границы, построенные по плотностной модели (слева) и значения литостатических аномалий на этих границах (справа). Глубина горизонтальных срезов литостатических аномалий равна средней глубине соответствующих изоплотностных границ

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФ, проект № 20-17-00058.

### Литература

- Ладовский И.В., Мартышко П.С., Федорова Н.В., Колмогорова В.В. Опыт построения трехмерной сейсмоплотностной модели по скоростным разрезам ГСЗ // Уральский геофизический вестник. 2016. № 2 (28). С. 108–120.
- Мартышко П.С., Ладовский И.В., Бызов Д.Д. О решении обратной задачи гравиметрии на сетках большой размерности // Доклады Академии наук. 2013. Т. 450. № 6. С. 702–707.
- Мартышко П.С., Ладовский И.В., Бызов Д.Д. Об устойчивых методах интерпретации данных гравиметрии // Доклады Академии наук. 2016а. Т. 471. № 6. С. 725–728. DOI:[10.7868/S0869565216360160](https://doi.org/10.7868/S0869565216360160)
- Мартышко П.С., Ладовский И.В., Фёдорова Н.В., Бызов Д.Д., Цидаев А.Г. Теория и методы комплексной интерпретации геофизических данных. Екатеринбург: УрОРАН, 2016б. 94 с.

## CONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL SEISMIC-DENSITY MODELS OF THE EARTH'S CRUST USING PARALLEL ALGORITHMS

Martyshko P.S., Ladovsky I.V., Tsidaev A.G., Byzov D.D.

*Institute of Geophysics UB, RAS, Yekaterinburg, Russia*

*E-mail: [pmart3@mail.ru](mailto:pmart3@mail.ru)*

УДК 550.34.013.2

## ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКОНА ПРОДУКТИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАЗРУШЕНИЮ ГОРНЫХ ПОРОД

Маточкина С.Д.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия*

E-mail: [sofjamat@mail.ru](mailto:sofjamat@mail.ru)

(стендовый доклад)

**Аннотация.** В данной работе проводится проверка выполнения закона продуктивности землетрясений [Shebalin et al., 2020] в лабораторных условиях. Выявлено, что для событий акустической эмиссии в рассмотренных образцах характерно одномодальное распределение функции близости до ближайшего соседа. Показано выполнение закона продуктивности землетрясений в лабораторных условиях, говорящее о подобии природы афтершоковых событий в лабораторных условиях природе реальных землетрясений.

**Ключевые слова:** закон продуктивности землетрясений, продуктивность, функция близости, акустическая эмиссия, лабораторный эксперимент

При анализе сейсмических событий было выявлено, что продуктивность землетрясений подчиняется экспоненциальному закону [Shebalin et al., 2020], что не согласуется с существующими моделями сейсмического режима [Marsan, Lengline, 2008; Ogata, 1989]. Здесь под продуктивностью понимается число сейсмических событий в определенном диапазоне магнитуды, имеющих причинно-следственную связь с данным землетрясением. В настоящее время вопрос о природе закона продуктивности землетрясений и факторов, определяющих значения его параметров, остается открытым.

Исследования закономерностей разрушения геологических материалов и их моделей при вариациях параметров напряженно-деформированного состояния среды и ее физических свойств можно осуществить в условиях физического эксперимента. Наиболее известные модели подготовки землетрясений, претендующие на объяснение природы предвестников, в большой степени опираются на результаты лабораторных экспериментов (см. обзор, например в [Смирнов, Пономарев, 2020, с. 252–258]).

Для анализа были выбраны две серии экспериментов: серия АЕ (АЕ36, АЕ39, АЕ42) – в ходе лабораторных исследований цилиндрические образцы, изготовленные из гранита, деформировались одноосной нагрузкой в условиях постоянного всестороннего сжатия (Лаборатория трения горных пород (Rock friction laboratory, USGS, Menlo Park, USA)) [Смирнов, Пономарев, 2020, с. 252–258]; серия ВS (ВS02, ВS03, ВS04) – эксперименты с обводненными образцами песчаника, проведенными в Лаборатории геомеханики



и реологии (GFZ, Potsdam) [Смирнов и др., 2019]. Истории нагружения образцов гранита и песчаника представлены на рис. 1а и рис. 1б соответственно.

Используемое в выбранных опытах оборудование и методика экспериментов обеспечивают выполнение критериев подобия лабораторного и натурального процесса по некоторым параметрам [Смирнов, Пономарев, 2020, с. 252–258].

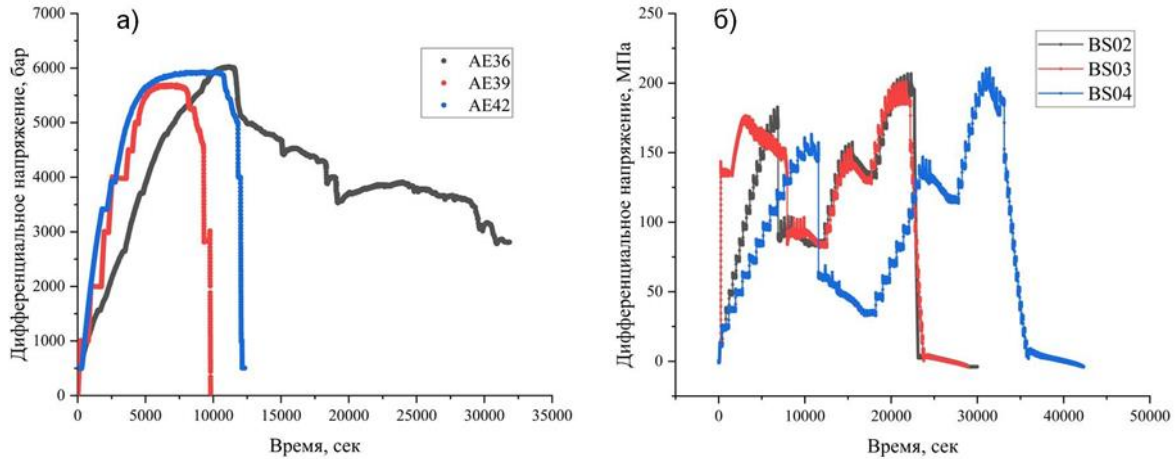


Рис. 1. История нагружения образцов (дифференциальные напряжения) в экспериментах: а) AE36, AE39, AE42 и б) BS02, BS03, BS04

Для определения связей между событиями и их разделения в каталоге на кластеризованные и независимые для последующего анализа продуктивности связанных событий используется метод ближайшего соседа, устанавливающий однозначную связь двух событий друг с другом в пространстве, времени и магнитуде [Zaliapin, 2008]. В качестве меры связи между землетрясениями используется функция близости [Baiesi, Paczuski, 2004]

$$\eta_{ij} = \begin{cases} t_{ij}(r_{ij})^d 10^{-bm_i}, & t_{ij} > 0 \\ +\infty, & t_{ij} \leq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где индексы указывают порядковый номер землетрясения во времени;  $t_{ij}$  – время между землетрясениями,  $r_{ij}$  – пространственное расстояние между эпицентрами,  $d$  – фрактальная размерность распределения эпицентров,  $b$  – наклон графика повторяемости,  $m_i$  – магнитуда первого по времени события.

Вводя порог  $\eta_0$ , можно разделить фоновые ( $\eta > \eta_0$ ) и связанные ( $\eta \leq \eta_0$ ) события.

С использованием относительного порога магнитуды  $\Delta M$  для учета масштабной инвариантности показано, что продуктивность, связанная с каждым событием, является случайной величиной, которая следует экспоненциальному распределению (рис. 2) [Shebalin et al., 2020].

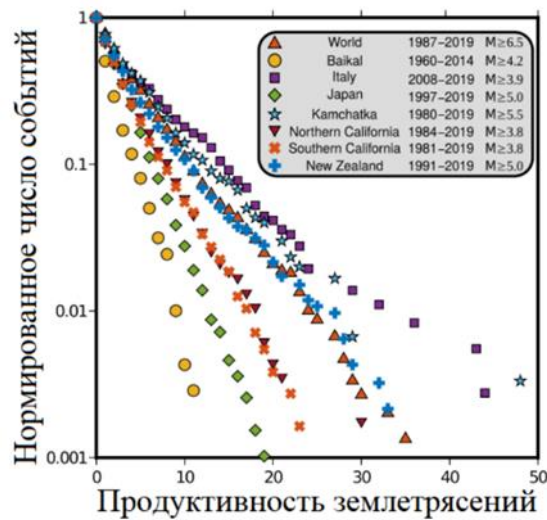


Рис. 2. Распределение продуктивности землетрясений для различных регионов [Shebalin et al., 2020]

Для определения порога функции близости были построены распределения функции близости до ближайшего соседа (см. пример на рис. 3): реальное, случайное и кластеризованное. В отличие от анализированных реальных землетрясений [Баранов, Шебалин, 2019, с. 29–108; Shebalin et al., 2020], в случае лабораторных исследований наблюдается одномодальное распределение для каждого из этапов эксперимента. Пороговое значение в данной работе определялось следующим образом: построение реального распределения; создание случайного каталога путем случайного перемешивания времен событий относительно их координат и магнитуд; нормировка случайного распределения таким образом, чтобы функции случайного и реального графиков были максимально близки к друг другу после значения  $\eta_{4/5}$  [Shebalin et al., 2020]; построение кластеризованного распределения, нахождение порога как точку пересечения аналогичных кумулятивной функции распределения графиков  $F_{случ}$  и  $(1 - F_{класт})$  [Shebalin et al., 2020] (рис. 3б).

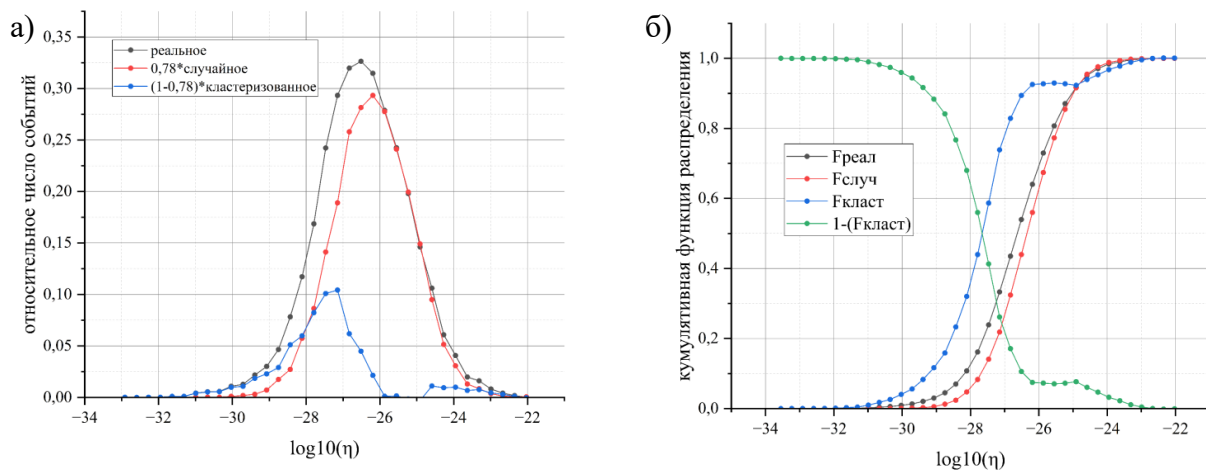


Рис. 3. а) График распределения функции близости до ближайшего соседа, б) график кумулятивной функции распределения (для эксперимента BS02)

Благодаря полученным по вышеописанному методу пороговым значениям функции близости были построены распределения продуктивностей для каждого анализируемого лабораторного эксперимента (см. примеры, рис. 4). Все рассмотренные эксперименты подчиняются экспоненциальному распределению.

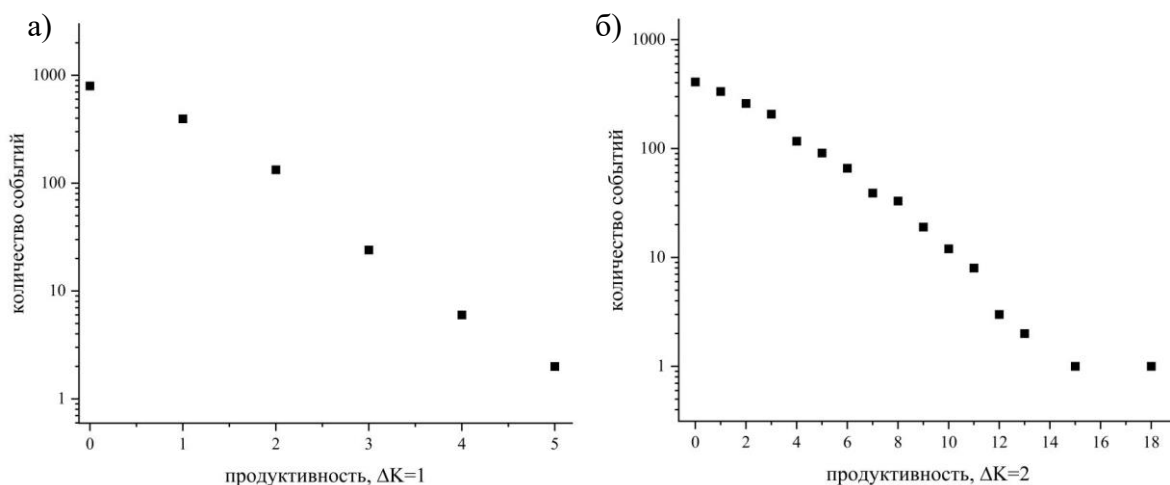


Рис. 4. Распределение продуктивности событий акустической эмиссии для областей экспериментов после магистрального разлома (областей афтершоковых событий) а) АЕ42, б) BS02

Автор выражает особую благодарность В.Б. Смирнову и А.В. Пономареву за предоставленные данные и консультации по особенностям лабораторных экспериментов, в которых они получены, а также П.Н. Шебалину за постоянное внимание к работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 20-17-00180-П).

### Литература

- Баранов С.В., Шебалин П.Н. Закономерности постсейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. М.: РАН, 2019. 218 с.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН, 2020. 412 с.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Станциц С.А., Потанина М.Г., Патонин А.В., Dresen G., Narteau C., Bernard P., Строганова С.М. Лабораторное моделирование афтершоковых последовательностей: зависимость параметров Омори и Гутенберга–Рихтера от напряжений // Физика земли. 2019. № 1. С. 149–165. DOI:[10.31857/S0002-333720191149-165](https://doi.org/10.31857/S0002-333720191149-165)
- Baiesi M., Paczuski M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // Physical Review E. 2004. V. 69. 066106. DOI:[10.1103/PhysRevE.69.066106](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.066106)
- Marsan D., Lengline O. Extending Earthquakes' Reach through Cascading // Science. 2008. V. 319. P. 1076–1079. DOI:[10.1126/science.1148783](https://doi.org/10.1126/science.1148783)
- Ogata Y. Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis // Tectonophysics. 1989. V. 169. No 1–3. P. 159–174. DOI:[10.1016/0040-1951%2889%2990191-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951%2889%2990191-1)

- Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V.* Earthquake productivity law // *Geophysical Journal International*. 2020. V. 222. No 2. P. 1264–1269. DOI:[10.1093/gji/ggaa252](https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252)
- Zaliapin I., Gabrielov A., Keilis-Borok V., Wong H.* Clustering analysis of seismicity and aftershock identification // *Physical Review E*. 2008. V. 101. No 1. 018501. DOI:[10.1103/physrevlett.101.018501](https://doi.org/10.1103/physrevlett.101.018501)

## VERIFICATION OF THE EARTHQUAKE PRODUCTIVITY LAW IN LABORATORY ROCK FRACTURE EXPERIMENTS

Matochkina S.D.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*E-mail: [sofjamat@mail.ru](mailto:sofjamat@mail.ru)*

УДК: 550.31

## СМЕЩЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ОБЛАСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ТУРЦИИ 06.02.2023 НА КОСЕЙСМИЧЕСКОМ И ПОСТСЕЙСМИЧЕСКОМ ЭТАПЕ И МОДЕЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Михайлов В.О.<sup>1</sup>, Бабаянц И.П.<sup>1</sup>, Волкова М.С.<sup>1</sup>,  
Тимошкина Е.П.<sup>1</sup>, Смирнов В.Б.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия

E-mail: [msvolkova6177@gmail.com](mailto:msvolkova6177@gmail.com), [mikh@ifzl.ru](mailto:mikh@ifzl.ru)

**Аннотация.** По радарным снимкам спутника Сентинель-1А методами офсетов и дифференциальной интерферометрии DInSAR определены поля смещений в области Восточно-Анатолийской зоны разломов (ВАЗР) и разломов Сюргу-Чардак, а также небольшого разлома на продолжении Восточно-Хатайской разломной зоны, смещения на котором инициировали серию катастрофических землетрясений в Турции 06 февраля 2023 года. Наиболее детальная картина смещений получена методом офсетов по снимкам с нисходящей орбиты, которые имеют максимальное отношение сигнал/шум. Для северной части области, выше 37.4° с.ш., использованы смещения перпендикулярно орбите спутника (по дальности), полученные методом офсетов с нисходящей орбиты. Южнее параллели 37.0° с.ш. использованы смещения параллельно орбите (по азимуту) с той же нисходящей орбиты.

Модель поверхности разрыва построена на основе решения задачи о деформациях поверхности сферической, радиально расслоенной планеты в результате смещений по падению и простиранию на расположенной внутри нее прямоугольной площадке [Pollitz, 1996]. Как показано в этой работе, игнорирование радиальной расслоенности планеты может приводить к ошибкам до 20%, при этом наибольшие ошибки возникают при наличии большой сдвиговой компоненты. Также ошибку вносит и игнорирование сферичности при использовании решения в рамках идеализации упругого однородного полупространства с плоской свободной границей [Okada, 1985], на основе которой построены модели USGS (<https://www.usgs.gov/>) и [Barbot et al., 2023].

Поверхности сейсмических разрывов аппроксимированы 19 прямоугольными элементами по простиранию, поделенными на три уровня по падению. Еще один элемент аппроксимировал разрыв на продолжении Восточно-Хатайской зоны разломов.

В построенной нами модели на южном участке ВАЗР величины смещений возрастают с юга на север и в основном концентрируются в верхней части земной коры до глубины в 10 км, что согласуется с моделями других авторов. На южном окончании этого разрыва смещения в нашей модели с амплитудой до 2 м фиксируются на нижних уровнях модели, а на верхнем ее уровне смещения составили всего 0.11 м, и именно в этой области 20.02.2023 произошло землетрясение магнитудой 6.3 с глубиной гипоцентра 11.5 км. Модель показывает, что основные смещения на ВАЗР произошли на его центральном сегменте. Здесь смещения растут с глубиной, их величина на нижних элементах модели достигает 10.2 м. На разломе Сюргу-Чардак существенные смещения произошли до глубины в 20 км; величина смещений превосходила 9.8 м.

Согласно нашей модели на северо-восточном окончании сейсмического разрыва вдоль ВАЗР область смещений величиной 6.8 м перекрывается с юго-западным окончанием модели сейсмического разрыва землетрясения Доганьол-Сиврис (Doğanyol-Sivrice) 24.01.2020 с  $M_w$  6.7, опубликованной на сайте USGS. В результате наша модель не подтверждает гипотезу о наличии здесь сейсмической брешы, которая, согласно [Barbot et al., 2023], должна была явиться зоной возможного ближайшего землетрясения.

**Ключевые слова:** землетрясение, Турция, 6 февраля 2023 г., Восточно-Анатолийская зона разломов, спутниковая интерферометрия, офсеты, модель поверхности разрыва, постсейсмические смещения

По радарным снимкам спутника Сентинель-1 построены поля смещений в области Восточно-Анатолийской зоны разломов (ВАЗР) и разломов Сюргу-Чардак, а также небольшого разлома на продолжении Восточно-Хатайской разломной зоны, смещения на котором инициировали серию катастрофических землетрясений в Турции 06.02.2023. В Восточно-Хатайской зоне произошло главное событие, с магнитудой 7.8, а спустя 9 часов, на 90 километров севернее произошло второе крупное землетрясение с магнитудой 7.5 на разломе Сюргу-Чардак.

Использованы методы дифференциальной интерферометрии для расчёта смещений в направлении распространения радарного сигнала (line-of-sight, LOS) и метод офсетов для расчёта горизонтальных смещений в направлении полета спутника (азимута,  $Az$  на рис. 1) и перпендикулярно орбите (по наклонной дальности,  $R$  на рис. 1). В целом, все поля смещений согласуются, но из-за различной геометрии съемки максимальное отношение сигнал/шум получено для смещений, рассчитанных методом офсетов по снимкам с 21-й нисходящей орбиты (рис. 1).

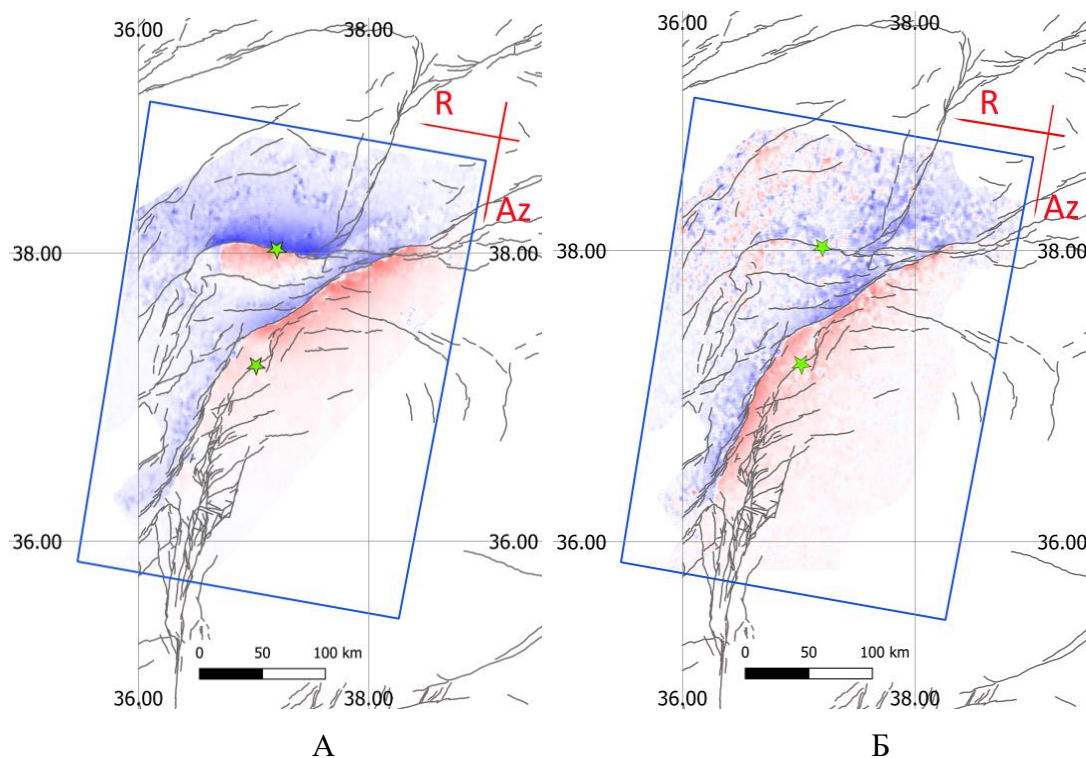


Рис. 1. Смещения земной поверхности (м), определенные методом офсетов. По снимкам с нисходящей орбиты в направлении дальности (А) положительными считаются смещения на восток и азимута (Б) положительными на север. Звёздами отмечены эпицентры землетрясений с магнитудой 7.8 (расположена южнее) и 7.5 (расположена севернее)

Данные о смещениях были использованы для моделирования поверхности сейсмического разрыва вдоль ВАЗР. В северной части исследуемого района были

использованы результаты смещений по дальности (рис. 1А), для южной части – результаты смещений по азимуту (рис. 1Б).

На сайте USGS опубликована модель сейсмического разрыва землетрясения Доганьол–Сиврис (Doğanyol–Sivrice) 24.01.2020 с  $M_w$ 6.7, которое произошло на северо-востоке от землетрясения 06.02.2023. Важно решить вопрос: дошла ли поверхность разрыва землетрясения 06.02.2023 до разрыва 2020 года?

В работе [Barbot *et al.*, 2023] и USGS построена модель землетрясения 06.02.2023 на основе решения [Okada, 1985] и получен результат, что между двумя разрывами осталась не вскрытая зона. То есть здесь, вероятно, следует ожидать сейсмическое событие в ближайшем будущем. Об этом авторы работы [Barbot *et al.*, 2023] предупредили широкую общественность.

В нашей работе построена более детальная модель. Поверхности сейсмических разрывов были аппроксимированы 19 прямоугольными элементами по простиранию, поделенными на три уровня по падению. Еще один элемент аппроксимировал разрыв на продолжении Восточно-Хатайской зоны разломов. Решение найдено под регуляризирующим условием, что смещения близки к чистому сдвигу. Для построения использовано решение [Pollitz, 1996] о смещениях на поверхности сферической, радиально расслоенной планеты в результате сдвига по падению и простиранию на расположенной на заданной глубине прямоугольной площадке. В построенной нами модели (рис. 2) на южном участке ВАЗР величины смещений возрастают с юга на север и в основном концентрируются в верхней части земной коры до глубины в 10 км. На южном окончании этого разрыва смещения в нашей модели с амплитудой до 2 м фиксируются на нижних уровнях модели, а на верхнем ее уровне смещения составили всего 0.11 м. Именно в этой области 20.02.2023 произошло землетрясение магнитудой 6.3 с глубиной гипоцентра 11.5 км. Основные смещения на ВАЗР определены на его центральном сегменте. Здесь смещения уходят на большую глубину, их величина достигает 10.2 м. На разломе Сюргу-Чардак существенные смещения произошли до глубины 20 км; величина смещений превосходила 9.8 м. В нашей модели на северо-восточном окончании сейсмического разрыва вдоль ВАЗР область смещений величиной 6.8 м перекрывается с юго-западным окончанием модели сейсмического разрыва землетрясения Доганьол–Сиврис (Doğanyol–Sivrice) 24.01.2020. Поэтому наша модель не подтверждает гипотезу о наличии здесь сейсмической брешы. Расхождение нашей модели и модели поверхности разрыва, опубликованной USGS и в [Barbot *et al.*, 2023], в частности, связана с тем, что модель [Barbot *et al.*, 2023], построенная на основе решения [Okada, 1985], подразумевает игнорирование сферичности и радиальной расслоенности планеты, что может приводить к ошибкам до 20%, как показано в [Pollitz, 1996].

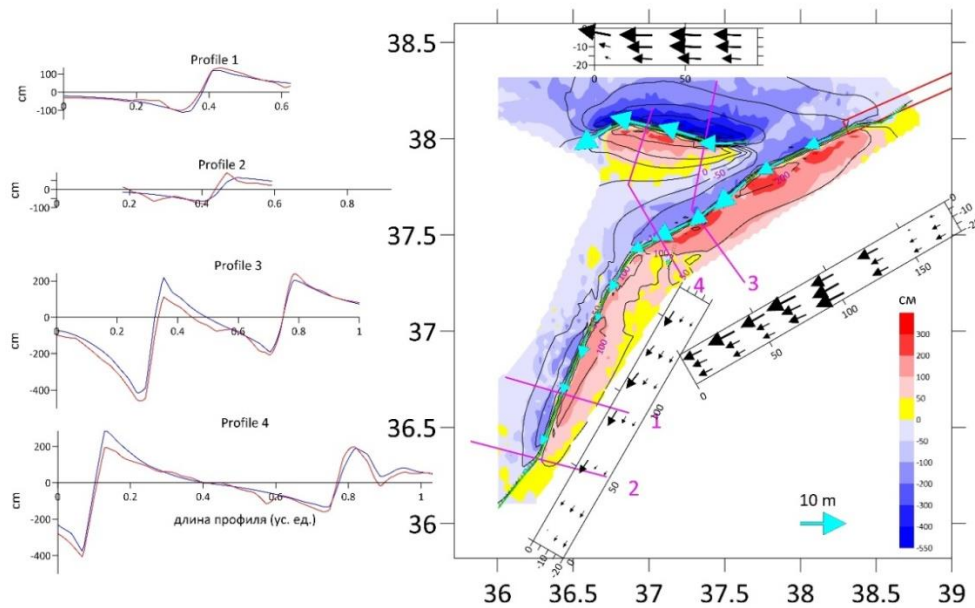


Рис. 2. Модель поверхности разрыва землетрясений 06.02.2023, построенная по данным РСА интерферометрии. Цветовая карта – смещения земной поверхности по дальности (в см), определенные методом офсетов по снимкам с нисходящего трека. Черные изолинии – те же смещения, рассчитанные по модели. Черные прямоугольники показывают поверхность разрыва в вертикальном разрезе, со смещениями на верхнем, среднем и нижнем уровне (голубые стрелки). Максимальная длина стрелки 10.2 м на верхнем уровне центрального сегмента ВАЗР. Бордовые линии – профили через область разрыва. Слева для этих профилей показаны РСА данные (красный цвет) и подбор по модели (синий цвет). Красный прямоугольник на СВ окончании ВАЗР показывает часть модели землетрясения 24.01.2020, построенной в USGS

### Литература

- Barbot S., Luo H., Wang T., Hamiel Y., Piatibratova O., Javed M.T., Braitenberg C., Gurbuz G. Slip distribution of the February 6, 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone // *Seismica*. 2023. V. 2. No 3. DOI:[10.26443/seismica.v2i3.502](https://doi.org/10.26443/seismica.v2i3.502)
- Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *BSSA*. 1985. V. 75. No 4. P. 1135–1154.
- Pollitz F.F. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // *Geophysical Journal International*. 1996. V. 125. No 1. P. 1–14. DOI:[10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x)

## DISPLACEMENTS OF THE EARTH'S SURFACE IN THE AREA OF THE EARTHQUAKE IN TURKEY ON 02.06.2023 AT THE CO-SEISMIC AND POST-SEISMIC STAGES AND THE SEISMIC RUPTURE MODEL ACCORDING TO SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY DATA

Mikhailov V.O.<sup>1</sup>, Babayants I.P.<sup>1</sup>, Volkova M.S.<sup>1</sup>,  
Timoshkina E.P.<sup>1</sup>, Smirnov V.B.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

E-mail: [msvolkova6177@gmail.com](mailto:msvolkova6177@gmail.com), [mikh@ifzl.ru](mailto:mikh@ifzl.ru)



УДК 550.348

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ К ВУЛКАНИЧЕСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА KISS

Молокова А.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

E-mail: [molokova.ap18@physics.msu.ru](mailto:molokova.ap18@physics.msu.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** В рамках эксперимента KISS (2015–2016 гг.) было записано 2136 сейсмических событий. В данной статье представлены результаты применения метода спектральных отношений к идентифицированным вулканическим землетрясениям, записанным в рамках эксперимента KISS, для изучения и определения очаговых параметров вулканических землетрясений, таких как сейсмический момент и характерные частоты спектра.

**Ключевые слова:** вулканическое землетрясение, очаг землетрясения, модель Бруна, спектр Фурье, метод спектральных отношений

Традиционно вулканические землетрясения разделяют на два основных типа: высокочастотные (вулкано-тектонические) и низкочастотные (длиннопериодные). Большинство высокочастотных землетрясений вызваны сдвиговым разрушением или скольжением по разломам, происходящими в земной коре под вулканами, и отличаются от тектонических магнитудами и характерными особенностями возникновения. Низкочастотные же землетрясения в большинстве случаев вызваны процессами, непосредственно происходящими в питающей магматической системе и связанными с быстрыми изменениями давления жидкости, вызываемыми неоднородными процессами течения или газообразованием [McNutt, Roman, 2015].

В работе используются данные, полученные в результате проведения эксперимента KISS. В рамках эксперимента KISS (Klychevskoy Investigation – Seismic Structure of an Extraordinary Volcanic System), главной целью которого являлось изучение глубинной структуры коры и верхней мантии в районе Ключевской группы вулканов, 83 автономные сейсмические станции были установлены сроком на 1 год в 2015–2016 гг. [Шатино и др., 2017]. В результате работы сейсмостанций в рамках эксперимента KISS было записано 2136 событий [Сенюков и др., 2021]. Из них были идентифицированы вулканические землетрясения. В данной работе демонстрируется применение метода спектральных отношений для изучения очаговых параметров вулканических землетрясений под вулканами Ключевской группы на Камчатке по данным эксперимента KISS.

Вулканические землетрясения были идентифицированы по данным каталога KISS с помощью оценки соотношения между низкими и высокими частотами. Чтобы оценить соотношение спектральных амплитуд между частотами длиннопериодных (ДП) и высокочастотных (ВЧ) землетрясений, вычисляется логарифм спектрального отношения:

$$\ln\left(\frac{\sum v_{lp}/n_{lp}}{\sum v_{hf}/n_{hf}}\right), \quad (1)$$

где  $\sum v_{lp}$  и  $\sum v_{hf}$  – суммы значений амплитуд длиннопериодных и высокочастотных землетрясений,  $n_{lp}$  и  $n_{hf}$  – число частот в ДП и ВЧ диапазонах.

По полученному значению логарифма можно сделать вывод о типе вулканического землетрясения по характерной частоте. Идентифицированные вулканические землетрясения под Ключевской группой вулканов, записанные в рамках эксперимента KISS, представлены на рис. 1.

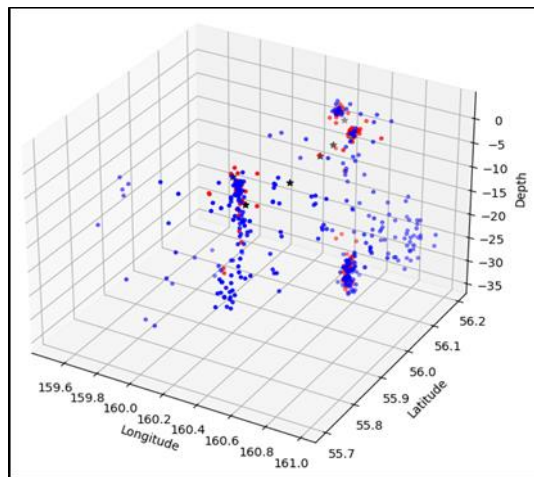


Рис 1. Карта вулканических землетрясений под КГВ, записанных в рамках эксперимента KISS. Синие символы – ВЧ землетрясения, красные – ДП землетрясения, черные – вулканы

Для исключения из анализа шумовых записей в данной работе была сделана оценка соотношения сигнала к шуму, где выбирались два временных отрезка одинаковой длины. Один – сигнал, записанный до события, другой – запись самого события. Производилось деление средних амплитуд данных отрезков, и оценивалось соотношение сигнала к шуму. Хорошее – соотношение больше 2, плохое – меньше 2. Для определения границы сигнал – шум берется время в очаге из каталога и к нему добавляется время прохождения сигнала от землетрясения до станции:

$$t = t_0 + \frac{S}{v_p}, \quad (2)$$

где  $t_0$  – время в очаге из каталога,  $S$  – расстояние от землетрясения до станции,  $v_p$  – скорость  $p$ -волны.

Для метода спектральных отношений необходимо, чтобы хорошее отношение «сигнал – шум» сохранялось в широком диапазоне частот. Для этого для всех вулканических землетрясений, записанных в рамках эксперимента KISS, при отборе записей для анализа была проведена оценка соотношения между сигналом и шумом по площадям. На одном графике строятся спектры Фурье сигнала и шума, и считается площадь разности этих двух графиков. Хорошо записанные события, отношение сигнала к шуму которых приемлемо в широком диапазоне частот, имеют большую данную площадь. Записи же с шумом имеют либо довольно малую площадь, либо отрицательную.

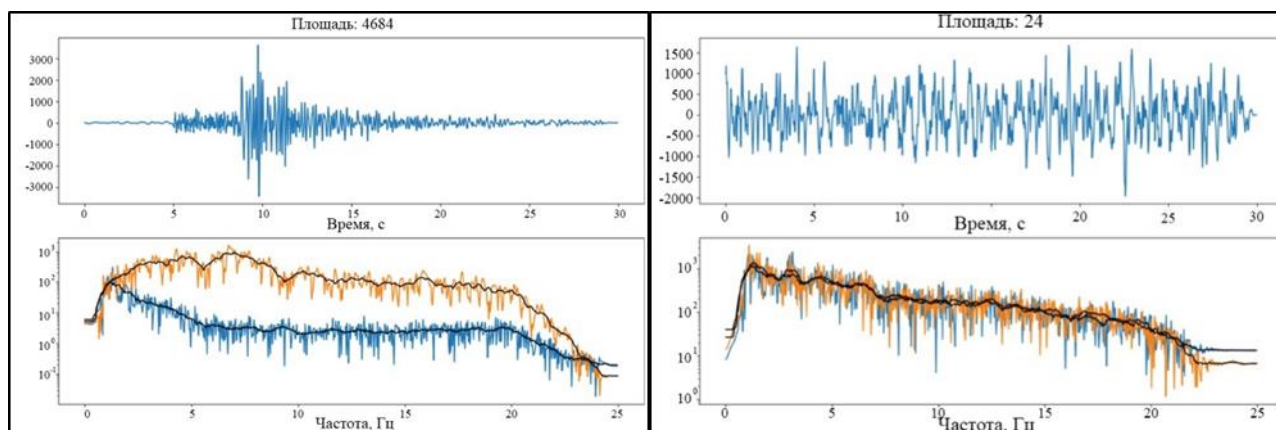


Рис. 2. Записи событий (сверху) и соответствующие им спектры Фурье сигнала и шума (снизу). Синий – запись шума, оранжевый – запись события

Метод спектральных отношений используется для изучения и определения очаговых параметров вулканических землетрясений, таких как сейсмический момент и характерные частоты спектра [Abercrombie, 2015]. В методе используются записи, полученные на одной и той же станции от событий, которые расположены максимально близко в пространстве. Для одной и той же пары землетрясений получается много отношений вследствие большого числа станций, записывающих событие. Отношения наблюдаемых спектров от выбранной пары близких в пространстве землетрясений сравниваются с теоретическими. Теоретическое отношение спектров рассчитывается по формуле модели Бруна:

$$\frac{\dot{M}_1(f)}{\dot{M}_2(f)} = \frac{M_{01}}{M_{02}} \left( \frac{1 + \left(\frac{f}{f_{c2}}\right)^{pn}}{1 + \left(\frac{f}{f_{c1}}\right)^{pn}} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (3)$$

где  $\dot{M}_1$  и  $\dot{M}_2$  – амплитудные спектры сильных и слабых землетрясений соответственно,  $f$  – частота,  $f_{c1}$  и  $f_{c2}$  – корнер-частоты сильных и слабых землетрясений соответственно,  $M_{01}$  и  $M_{02}$  – сейсмические моменты сильных и слабых землетрясений соответственно,  $n$  – параметр, который определяет асимптотический наклон правой ветви спектра,  $\gamma$  – константа, которая определяет остроту спектрального угла.

Для обработки из каталога KISS было выбрано несколько сотен пар близко расположенных вулканических землетрясений. Рассмотрим применение метода

спектральных отношений на двух примерах – парах близкорасположенных длиннопериодных (рис. 3а) и высокочастотных (рис. 3б) землетрясений с хорошей оценкой сигнал – шум по площадям. В табл. 1 приведены параметры выбранных пар землетрясений.

Таблица 1. Параметры выбранных пар землетрясений

	Тип пары землетрясений	Расстояние между событиями, м	Время UTC	Широта	Долгота	Глубина, км	ML
1	ДП	998	2015-11-28 15-54-05.408	56.0711	160.6201	-0.186	2.45
			2015-11-28 14-37-20.839	56.0661	160.632	-0.195	1.0
2	ВЧ	1357	2015-10-20 17-06-30.252	55.8365	160.2447	19.98	2.65
			2015-11-20 12-28-18.834	55.8395	160.2258	19.4	1.6

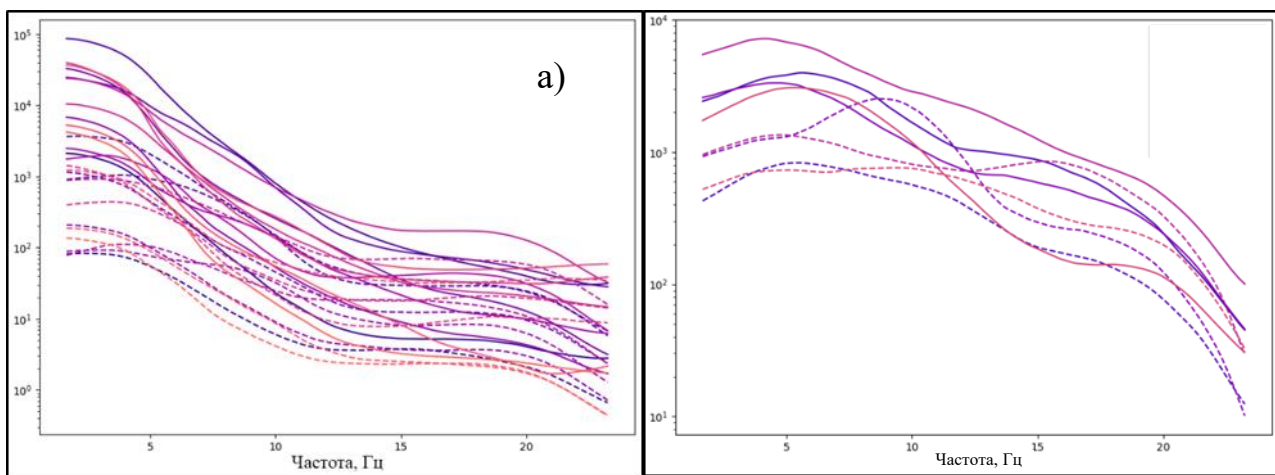


Рис. 3. а) Спектры сильного события (сплошная) и слабого (пунктир) для пары длиннопериодных землетрясений; б) спектры сильного события (сплошная) и слабого (пунктир) для пары высокочастотных землетрясений

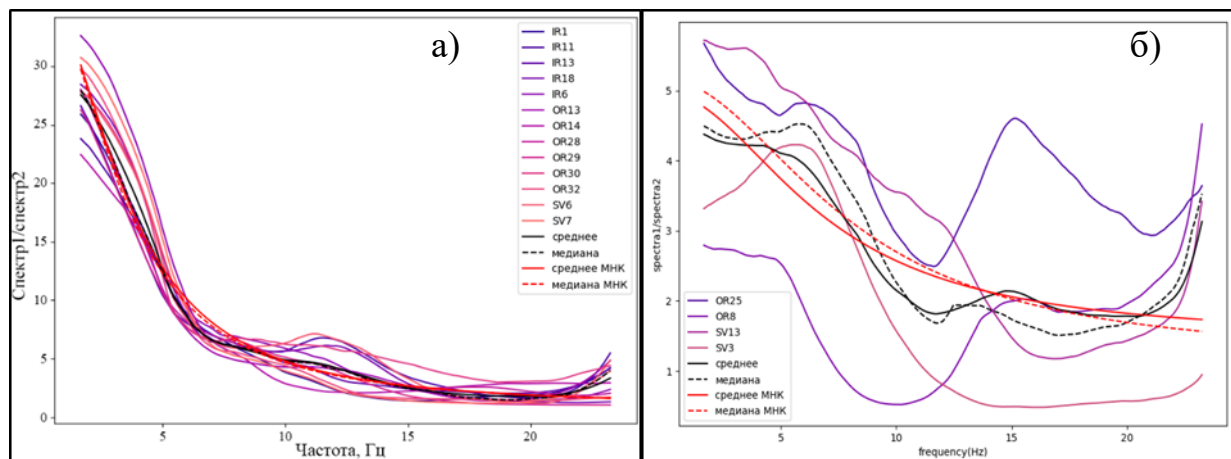


Рис. 4. а) Спектральные отношения сильного события к слабому для пары длиннопериодных землетрясений; б) спектральные отношения сильного события к слабому для пары высокочастотных землетрясений

На примере рассмотренных событий удалось получить альтернативные оценки отношения сейсмических моментов и оценки характерных частот очаговых спектров для пар длиннопериодных и высокочастотных землетрясений. Полученные спектральные отношения

представлены на рис. 4. Для сопоставления теоретических и наблюдаемых отношений спектров выполняется аппроксимация по МНК по среднему и по медиане. Полученные оценки приведены в табл. 2.

Таблица 2. Полученные альтернативные оценки для выбранных пар землетрясений

	Тип пары землетрясений	Аппроксимация	$M_{01}/M_{02}$	$f_{c1}$ , Гц	$f_{c2}$ , Гц
1	ДП	По среднему	36.6	3.6	24.3
		По медиане	36.5	3.4	22.4
2	ВЧ	По среднему	5.0	6.8	12.6
		По медиане	5.2	7.9	16.9

Анализ спектров пар событий, записанных в рамках эксперимента KISS, предварительно показал, что длиннопериодные события достаточно неплохо описываются классической моделью Бруна, соответственно, и их отношения оказываются ближе к теоретическим. В случае высокочастотных событий расхождения более существенные, что может указывать на более сложную природу очага.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-17-00180-П).*

### Литература

- Сенюков С.Л., Дроздин Д.В., Дроздина С.Я., Шапиро Н.М., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Соболевская О.В., Назарова З.А., Должикова А.Н., Толокнова С.Л., Карпенко Е.А. Каталог землетрясений по данным сети KISS в 2015–2016 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов: Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 216–220.
- Шапиро Н.М., Гордеев Е.И., Абкадыров И.Ф., Кулаков И.Ю., Яковлев А.В. Широкомасштабный полевой сейсмологический эксперимент для изучения Ключевской группы вулканов // Вестник ДВО РАН. 2017. № 1 (191). С. 75–78.
- Abercrombie R.E. Investigating uncertainties in empirical Green's function analysis of earthquake source parameters // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2015. V. 120. P. 4263–4277. DOI:[10.1002/2015JB011984](https://doi.org/10.1002/2015JB011984)
- McNutt S.R., Roman D.C. Volcanic Seismicity // The Encyclopedia of Volcanoes. Amsterdam: Academic Press, 2015. P. 1011–1034. DOI:[10.1016/B978-0-12-385938-9.00059-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00059-6)

## APPLICATION OF THE SPECTRAL RELATIONS METHOD TO VOLCANIC EARTHQUAKES OF THE KLYUCHEVSKAYA GROUP OF VOLCANOES ACCORDING TO THE KISS EXPERIMENT

Molokova A.P.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow, Russia

E-mail: [molokova.ap18@physics.msu.ru](mailto:molokova.ap18@physics.msu.ru)

УДК 550.34

## МЕТОД ВЕРОЯТНОСТНОЙ ЛОКАЦИИ РАННЕИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Морозов А.Н.<sup>1</sup>, Асминг В.Э.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Кольский филиал Федерального исследовательского центра  
«Единая геофизическая служба РАН», г. Апатиты, Россия*

*E-mail: [morozovalexey@yandex.ru](mailto:morozovalexey@yandex.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** Существуют территории, которые, с одной стороны, характеризуются умеренной сейсмичностью, но с другой – не обладали долгое время плотной сетью сейсмических станций из-за малонаселённости, труднодоступности и невысокого уровня их экономического развития. Для таких территорий характерны землетрясения, по которым имеются небольшое количество макросейсмических сведений и данные лишь по одной или двум сейсмическим станциям. Чаще всего при локации таких землетрясений использовались только макросейсмические сведения. Авторами в данной статье предложена методика вероятностной оценки локации таких землетрясений на основе совместного анализа их макросейсмических и инструментальных данных. Методика реализована в программе ProLom (Probabilistic Locator by Macroseismics). В статье проведена проверка работоспособности метода на тестовом землетрясении 20 мая 1967 г. и приведены результаты анализа землетрясений, произошедших на севере Восточно-Европейской платформы 30 июня 1911 г. и 13 января 1939 г.

**Ключевые слова:** метод локации, раннеинструментальные землетрясения, север ВЕП

С начала XX века в мире началось интенсивное развитие инструментальных сейсмических наблюдений. Стали появляться сейсмические станции при обсерваториях и университетах в Италии, Германии и Швеции; первые национальные сети в России и Японии; международные сети Дж. Милна (John Milne) «Milne Seismographic Network» и ордена иезуитов «Jesuit Network» [Schweitzer, 2007; Storchak et al., 2015]. Впоследствии развитие инструментальных наблюдений в мире происходило преимущественно в сейсмоактивных регионах. Именно в таких районах происходило увеличение количества сейсмических станций. При этом оставались регионы, характеризующиеся проявлением умеренной сейсмичности, но в силу географических, исторических, а также экономических причин развитие инструментальных наблюдений там происходило очень медленно.

Одним из таких регионов был север Восточно-Европейской платформы (ВЕП). Сведения по историческим землетрясениям и современные инструментальные данные указывают на повышенную сейсмическую активность некоторых районов севера платформы, в частности Беломорского региона. Однако из-за малонаселённости, труднодоступности и невысокого уровня экономического развития региона инструментальные наблюдения практически не развивались в первой половине XX века. В работе [Панасенко, 1977]

отмечается, что только с 1962 г. можно выделить начало инструментального этапа в изучении сейсмичности региона. До этого времени землетрясения изучались преимущественно по макросейсмическим данным, которые, в силу малонаселённости региона, характеризуются небольшой выборкой по значениям интенсивности и географическим пунктам. При этом для части таких землетрясений имеются инструментальные данные одной-двух станций, порой с ненадёжными определениями времён вступлений сейсмических фаз. Поэтому использовать только инструментальные данные для локации таких землетрясений не представляется возможным.

Авторами в данной статье предложена методика вероятностной оценки локации таких землетрясений на основе совместного анализа их макросейсмических и инструментальных данных [Морозов, Асминг, 2024]. Методика реализована в программе ProLom (Probabilistic Locator by Macro-seismics) [Асминг, Морозов, 2023]. В статье проведена проверка работоспособности метода на тестовом землетрясении 20 мая 1967 г.

Для решения задачи локации землетрясений совместно по макросейсмическим и инструментальным данным был использован подход, основанный на применении так называемого наивного Байесовского классификатора. Напомним вкратце идею классификатора. Теорема Байеса выражается следующим соотношением:

$$P(C|F_1, \dots, F_n) = \frac{P(C)P(F_1, \dots, F_n|C)}{P(F_1, \dots, F_n)}. \quad (1)$$

В нашем случае  $C$  – событие, заключающееся в том, что землетрясение произошло в некоторой области.  $(F_1, \dots, F_n)$  – проявления этого события как макросейсмические (наблюдались сотрясения некоторой интенсивности в тех или иных пунктах), так и инструментальные (приходы сейсмических волн на станции). Предположение наивности – это предположения о том, что  $(F_1, \dots, F_n)$  независимы. Априорные вероятности вариантов события  $C$  заранее неизвестны, положим их одинаковыми. С учетом этого (1) можно переписать в виде:

$$P(C|F_1, \dots, F_n) \sim \prod_i P(F_i|C). \quad (2)$$

Здесь  $P(F_i|C)$  имеет смысл вероятности проявления  $F_i$  при условии, что произошло событие  $C$ , т. е. что землетрясение произошло в тестируемой области. Далее мы предполагаем, что гипоцентр события магнитуды  $M$  (магнитуду и глубину фиксируем) с вероятностью 1 располагался в некоторой области на поверхности Земли. Разобьем эту область на маленькие элементы  $c_j$  и будем с помощью (2) оценивать вероятности  $P(c_j|F_1, \dots, F_n)$ , т. е. вероятности того, что событие произошло в данной ячейке при условии, что имели место его проявления  $F_i$ . Для нормировки воспользуемся тем, что вероятность того, что землетрясение произошло в большой области, равна 1, т. е.

$$\sum_j P(c_j | F_1, \dots, F_n) = 1. \quad (3)$$

Чтобы воспользоваться (2), нужно оценивать  $P(F_i | c_j)$ . Рассмотрим эти оценки для макросейсмических и инструментальных данных.

**Макросейсмические данные.** Проявление  $F_i$  – информация о том, что в некоторой точке с координатами  $(\varphi_i, \lambda_i)$  событие ощущалось в диапазоне интенсивностей (по шкале МСК-64) от  $I_{i0}$  до  $I_{i1}$ . Существуют известные формулы, связывающие магнитуду землетрясения и расстояние от эпицентра до точки наблюдения с интенсивностью, например формула Блэйка – Шебалина (в программе ProLom может использоваться любая зависимость). В общем виде ее можно записать как

$$I_{\text{истинная}} = I(M, R),$$

где  $R$  – расстояние до гипоцентра землетрясения в км, определяемое через расстояние до эпицентра  $r$  и глубину очага  $h$  как  $\sqrt{r^2 + h^2}$ .

Назовем интенсивность, рассчитанную по этой формуле, «истинной» (разумеется, она истинна только в том случае, если в данной точке действительно произошло событие данной магнитуды). Таким образом, оценка  $P(F_i | c_j)$  сводится к оценке вероятности  $P([I_{i0}, I_{i1}] | I_{\text{истинная}, j})$ , т. е. оценке вероятности того, что свидетель, находившийся в точке  $i$ , зафиксировал интенсивности из диапазона  $[I_{i0}, I_{i1}]$  при условии, что в реальности имела место интенсивность  $I_{\text{истинная}, j}$ .

Для этого введем эмпирическую функцию плотности вероятности того, что наблюдатель зафиксировал интенсивность  $I_{\text{набл}}$  при условии того, что на самом деле имела место интенсивность  $I_{\text{истинная}} - \rho(I_{\text{набл}} | I_{\text{истинная}})$ . Эта функция вводится интерпретатором из некоторых рациональных соображений и задается в табличном виде. Таким образом, с точностью до нормировки, мы имеем следующее выражение:

$$P(F_i | c_j) = P([I_{i0}, I_{i1}] | I_{\text{истинная}, j}) \sim \max_{I_{\text{набл}} \in [I_{i0}, I_{i1}]} \rho(I_{\text{набл}} | I_{\text{истинная}, j}). \quad (4)$$

**Инструментальные данные.** Инструментальные данные, которые предполагается использовать в данном подходе, это замеры времён приходов сейсмических волн на станции, сделанные по аналоговым сейсмограммам, полученным в конце XIX и в начале XX века. У таких сейсмограмм есть специфические особенности: а) неточная привязка ко времени; б) невозможность достоверно определить тип пришедшей волны. Это определило то, что в данном подходе совместно используются только времена приходов, взятые для одной и той же станции, и то, что вместо однозначного задания типа фазы используются вероятностные оценки, задаваемые пользователем.

Пусть для некоторой сейсмостанции задано  $N$  фаз с временами  $t_i$  и вероятностями типов фаз  $P_{ik}$ , где  $i$  – индекс фазы, а  $k$  – индекс типа фазы от 1 до 4 ( $P$ -волна,  $S$ -волна,  $Lg$ -



волна, ложное вступление). Назовем совместимой парой две фазы  $i_1$  и  $i_2$ , которым приписаны типы волны  $k_1$  и  $k_2$ , такую, что

$$T_{0,k_2} - T_{1,k_1} < t_{i_1} - t_{i_2} < T_{1,k_2} - T_{0,k_1}, \quad (5)$$

где  $T_{0,k}$  – минимальное, а  $T_{1,k}$  – максимальное время пробега волны типа  $k$  от источника до станции с учетом возможных ошибок взятия вступлений и скоростной модели. Также совместимыми будут считаться те пары, у которых одной из фаз приписан тип «ложное вступление». Окончательной оценкой реализации варианта с данными замера для данной точки и для данной станции, которая и используется в качестве сомножителя в (2), будет

$$\sum_{\text{по совместимым парам}} P_{i_1,k_1} \cdot P_{i_2,k_2}. \quad (6)$$

Описанный метод был реализован в программе ProLom (Probabilistic Locator by MacroSeismics) [Асминг, Морозов, 2023]. Программа позволяет пользователю задавать макросейсмическую информацию (ощущавшиеся интенсивности по шкале МСК-64 в определенных пунктах), добавлять к ней инструментальную информацию (замеры времен приходов сейсмических волн на станции) и получать вероятностную оценку локации сейсмических событий.

Для проверки работоспособности метода в качестве тестового события было взято землетрясение 20 мая 1967 г. Землетрясение произошло в Кандалакшском заливе Белого моря с  $mb(\text{ISC}) = 4.6$ . По этому землетрясению имеется большое количество инструментальных данных ( $N_{\text{станций}} = 72$ ), представленных в бюллетене Международного сейсмологического Центра (International Seismological Centre, ISC) [International..., 2023]. А также имеются макросейсмические сведения из 27 населённых пунктов, описанные в работах [Панасенко, 1974; Nikonov, 1991].

Был составлен модельный бюллетень из макросейсмических и инструментальных данных, наиболее характерный для землетрясений данного региона в первой половине XX века. В тот период в регионе функционировала одна сейсмическая станция PUL (Пулково), и макросейсмических сведений поступало значительно меньше, чем для землетрясения 20 мая 1967 г. Поэтому модельный бюллетень включал в себя инструментальные данные только одной станции PUL и макросейсмические сведения по 10 пунктам.

Решение программы ProLom для данного бюллетеня представлено на рис. 1. При локации использовалась региональная модель BARENTS [Kremenetskaya et al., 2001], эффективность которой для данного региона была подтверждена многократно по записям химических и ядерных взрывов [Kremenetskaya et al., 2001; Морозов и др., 2018]. В уравнении Блейка – Шебалина использовались вычисленные для данного района [Петрова и др., 2020] следующие коэффициенты макросейсмического поля:  $a = 1.5$ ,  $b = 3.55$ ,  $c = 3.05$ .

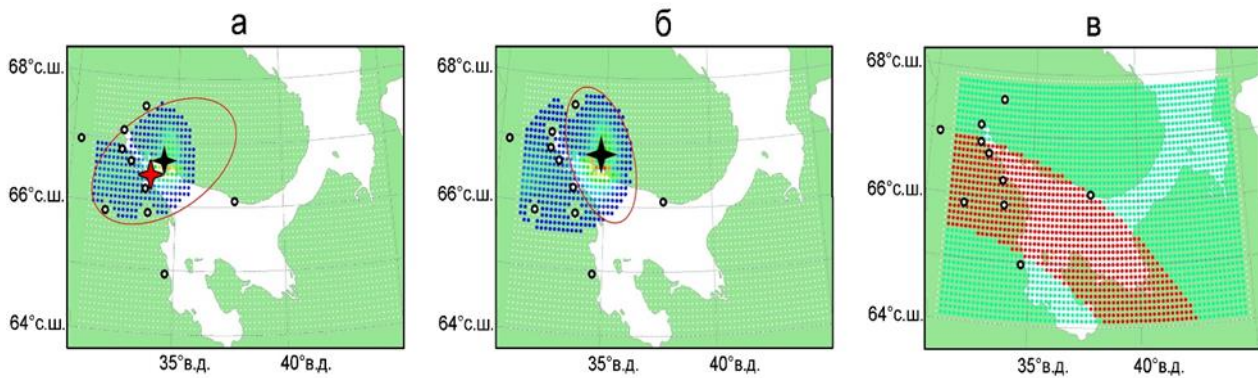


Рис. 1. Результат расчета программы ProLom на основе модельного бюллетеня, составленного из макросейсмических и инструментальных данных землетрясения 20 мая 1967 г.: *а* – решение на основе макросейсмических и инструментальных данных; *б* – решение на основе макросейсмических данных; *в* – решение на основе инструментальных данных. Черной звездой указан вычисленный эпицентр. Красной линией – эллипс ошибок. Красной звездой указан эпицентр землетрясения согласно ISC [International..., 2023]. Кружками указаны географические пункты со значениями интенсивности  $I$ . Разноцветными точками обозначают ячейки, в которых значение вероятности наличия в этой ячейке эпицентра отлично от нуля. Градация цвета зависит от значения вероятности: от меньшего (синего) до большего (красного)

Вычисленные программой ProLom координаты эпицентра совпадают в пределах эллипса ошибок с координатами по ISC (рис. 1). При ограниченном количестве исходных данных мы получили большие значения полуосей эллипса ошибок. При этом полученное решение на основе только макросейсмических данных (рис. 1б) отличается от решения на основе макросейсмических и инструментальных данных (рис. 1а). Последнее решение ближе всего к решению по ISC. Значение магнитуды  $M_S$  получилось равным 4.7.

Таким образом, данный пример показывает работоспособность метода, реализованного в программе ProLom. В статье [Морозов, Асминг, 2024] приведены результаты применения метода на конкретных землетрясениях первой половины XX века, произошедших на севере Восточно-Европейской платформы. Создан дополнительный инструмент вероятностной локации раннеинструментальных землетрясений, который позволяет использовать все доступные и порой скудные для удалённых и малоразвитых территорий данные по макросейсмическим проявлениям и временам вступлений на сейсмических станциях. Данный инструмент в дальнейшем будет применяться при анализе землетрясений на севере Восточно-Европейской платформы и при необходимости совершенствоваться.

### Литература

- Асминг В.Э., Морозов А.Н. ProLom. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617379 от 07 апреля 2023 г.
- Морозов А.Н., Асминг В.Э. Вероятностная локация раннеинструментальных землетрясений на основе макросейсмических и инструментальных данных // Физика Земли. 2024. № 1 (в печати).

- Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Михайлова Я.А.* Сейсмичность севера Русской плиты: уточнение параметров гипоцентров современных землетрясений // *Физика Земли*. 2018. № 2. С. 104–123. DOI:[10.7868/S0002333718020096](https://doi.org/10.7868/S0002333718020096)
- Панасенко Г.Д.* Землетрясения Фенноскандии в 1951-1970. М.: Изд-во МГК, 1977. 111 с.
- Панасенко Г.Д.* Сейсмическое событие в Кандалашском заливе Белого моря 20 мая 1967 г. // *Новейшие и современные движения земной коры восточной части Балтийского щита*. Петрозаводск: Изд-во Карельского ФАН СССР, 1974. С. 47–58.
- Петрова Н.В., Дягилев Р.А., Габсатарова И.П.* Особенности затухания сейсмического эффекта землетрясений Русской платформы и Урала // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2020. Т. 47. № 4. С. 5–25. DOI:[10.21455/VIS2020.4-1](https://doi.org/10.21455/VIS2020.4-1)
- International Seismological Centre [сайт]. URL:<http://www.isc.ac.uk/> (дата обращения 06.05.2023).
- Kremenetskaya E., Asming V., Ringdal F.* Seismic location calibration of the European Arctic // *Pure and Applied Geophysics*. 2001. V. 158. No 1. P. 117–128. DOI:[10.1007/978-3-0348-8250-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8250-7_9)
- Nikonov A.A.* Felt effects for earthquakes of the 20th century in the Eastern Baltic Shield. University of Helsinki, 1991. 34 p. ISBN 951-45-5777-8
- Schweitzer J.* The birth of modern seismology in the nineteenth and twentieth centuries // *Earth Sciences History*. 2007. V. 26. No 2. P. 263–280. DOI:[10.17704/eshi.26.2.q412767051228155](https://doi.org/10.17704/eshi.26.2.q412767051228155)
- Storchak D.A., Di Giacomo D., Engdahl E.R., Harris J., Bondár I., Lee W.H.K., Bormann P., Villaseñor A.* The ISC-GEM global instrumental earthquake catalogue (1900–2009): Introduction // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2015. V. 239. P. 48–63. DOI:[10.1016/j.pepi.2014.06.009](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.009)

## METHOD OF PROBABILISTIC LOCATION OF EARLY INSTRUMENTAL EARTHQUAKES BASED ON MACROSEISMIC AND INSTRUMENTAL DATA

Morozov A.N.<sup>1</sup>, Asming V.E.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Kola Branch, Geophysical Survey, RAS, Apatity, Russia*

E-mail: [morozovalexey@yandex.ru](mailto:morozovalexey@yandex.ru)

УДК 550.34

## КРИТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ РАЗРУШЕНИЯ И АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Наймарк О.Б.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*

*Email: [naimark@icmm.ru](mailto:naimark@icmm.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** Автомодельные закономерности развития сейсмических событий рассматриваются на основе развитых представлений о критической динамике стадийности разрушения в материалах. Показано, что известные законы скейлинга в сейсмичности связаны с динамикой коллективных мод дефектов, определяющих инициирование майншоков, прешоков и афтершоков.

**Ключевые слова:** критическая динамика разрушения, скейлинг в сейсмичности

Современные методы прогноза землетрясений связаны с пониманием фундаментальных закономерностей развития разрушения, включающих описание его стадийности как коллективного поведения ансамблей дефектов [Naimark, 2008]. Закономерности перехода от дисперсного (damage) к макроскопическому (failure) разрушению являются важными для понимания сейсмических событий и могут рассматриваться как основа мониторинга, включая различные проявления сейсмичности, а также разработки методологии для обобщения результатов лабораторных экспериментов на сейсмические масштабы. В связи с этим актуальной является разработка подходов, которые отражают фундаментальные черты процесса разрушения с учетом нелинейной физики коллективного поведения ансамблей дефектов. Попытки развить статистическую термодинамику мезоскопических дефектов (микросдвигов) применительно к задачам сейсмичности были предприняты в [Rundle et al., 2003]. В [Naimark, 2008] было показано, что коллективное поведение дефектов имеет признаки неравновесного критического явления – структурно-скейлингового перехода, сопровождающегося формированием коллективных мод дефектов, имеющих природу автомодельных. Это позволило предложить и реализовать программу широкодиапазонных лабораторных экспериментов (динамических, ударно-волновых), совмещенных с системами регистрации высокого пространственно-временного разрешения, подтвердивших связь различных сценариев перехода от дисперсного к макроскопическому разрушению с нелинейной динамикой коллективных мод дефектов, развития макроскопических трещин и закономерностями скейлинга, наблюдаемыми при развитии сейсмических событий. Обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований на модельных материалах, устанавливающие связь

динамики коллективных мод дефектов со стадийностью перехода к разрушению, автомодельными реакциями материалов и соотношениями скейлинга в сейсмичности.

**Коллективные моды дефектов в процессах деформации и разрушения твердых тел.** Статистическая термодинамика коллективного поведения ансамблей мезоскопических дефектов (микротрещин, микросдвигов) предложена в [Naimark, 2000] и основана на введении переменных, определяющих флуктуации поля деформаций, обусловленных дефектами. Решение статистической задачи позволило установить типы нелинейностей для макроскопического параметра «порядка» – деформации, индуцированной дефектами  $p$  в зависимости от величины приложенного напряжения  $\sigma$  и значений параметра структурного скейлинга  $\delta$ , определяющего взаимодействие между дефектами и играющего роль текущей восприимчивости материала к росту дефектов и закономерности «критичности» нелинейной динамики дефектов, связанные, в соответствие с полученным решением статистической задачи, нелинейным представлением неравновесной свободной энергии  $F$  (обобщение подхода Гинзбурга – Ландау) и кинетикой параметра «порядка»

$$\frac{dp}{dt} = -\Gamma_p \left( A(\delta, \delta_*)p - Bp^3 + C(\delta, \delta_c)p^5 - D\sigma - \frac{\partial}{\partial x_l} \left( \chi \frac{\partial p}{\partial x_l} \right) \right), \quad (1)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  – параметры разложения;  $\chi$  – параметр нелокальности,  $\Gamma_p$  – кинетический коэффициент,  $\delta_c$  и  $\delta_*$  – критические значения параметра структурного скейлинга. Показано существование автомодельных решений уравнения (1), описывающие два типа «спинодального распада» в различных областях метастабильности  $\delta > \delta_*$  и  $\delta < \delta_c$ : автосолитонных мод и диссипативных структур «обострения». Переход через точку бифуркации  $\delta_c$  сопровождается появлением пространственно-временных структур «обострения», когда кинетика  $p$  в пределе  $t \rightarrow t_c$  соответствует автомодельному решению вида  $p(x, \tau) = (\tau - \tau_c)^{-1/\beta} f(x/L_c)$ , в котором функция  $f(x)$  определяется решением соответствующей задачи на собственные значения, где  $\beta$  – степенной показатель уменьшения свободной энергии; масштаб  $L_c$ , так называемая фундаментальная длина, имеет смысл пространственного периода решения, в котором функция  $f(x)$  определяется решением соответствующей задачи на собственные значения. Автомодельное решение описывает взрывообразный рост дефектов при  $t \rightarrow t_c$  на спектре пространственных масштабов  $L_H = L_c k$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$  (автомодельные диссипативные структуры «обострения») [Naimark, Uvarov, 2004].

**Экспериментальная верификация.** Роль коллективных мод ансамблей дефектов, определяемых автомодельными решениями, в стадийности переходов от дисперсного к макроскопическому разрушению, распространении трещин, автомодельной структуре волновых фронтов исследована в работе [Naimark, 2008]. Показано, что формирование автосолиitonных волн в условиях «распада» метастабильности определяет универсальную степенную зависимость волновых фронтов при различных амплитудах импульсной нагрузки. «Подчинение» динамики среды коллективным модам дефектов автосолиitonной природы, локализованных на спектре пространственных и временных масштабов и распространяющихся с характерными скоростями  $V$ , ассоциировано в [Naimark, 2008] с динамикой пре- и афтершоков. Трансформация пре- и афтершоков в диссипативные структуры обострения, ассоциированных с динамикой майншоков при значениях параметра структурного скейлинга  $\delta_c$ , соответствует переходу к качественно новой динамике среды с дефектами, экспериментально исследованной при анализе динамического распространения трещин в ПММА и формировании волн разрушения в плавленном кварце [Naimark et al., 2017]. Скоростная съемка полей напряжений с использованием камеры REMIX (разрешение  $10^7$  кадров в секунду) позволила установить в предварительно нагруженной пластине ПММА переходы от устойчивого режима к ветвлению при скоростях  $V_C \sim 0.4V_R$  и определить режим, соответствующий критической скорости трещины  $V_B$  при «подчинении» динамики основной трещины динамике роста дочерних трещин, зарождающихся в режиме с обострением в «зоне процесса» в вершине трещины. Ветвь  $V > V_B$  (рис. 1) с выраженными признаками автомодельности (данная ветвь практически параллельна оси напряжений) аналогична «динамической ветви» в условиях откола, когда закономерности разрушения определяются резонансными условиями возбуждения множественных очагов разрушения. В [Naimark, 2019; Naimark et al., 2021] показано, что три обсуждаемых режима динамики трещины являются следствием существования двух типов аттракторов для динамических переменных: режим, определяемый автомодельным распределением (решение Ирвина) поля напряжений в окрестности вершины трещины ( $V < V_C$ ), и режим, соответствующий автомодельному решению, определяющему генерацию множественных обостряющихся коллективных мод в ансамбле дефектов при  $V > V_B$ . Установлена связь обсуждаемых автомодельных решений и статистики разрушения в зависимости от плотности энергии в предварительно нагруженном материале: при скоростях  $V < V_C$  реализуется детерминированная статистика разрушения, определяемая в основном пространственным распределением поля напряжений;

пуассоновская статистика при скоростях  $V > V_C$  и промежуточная (статистика Вейбулла), соответствующая области притяжения обоих аттракторов.

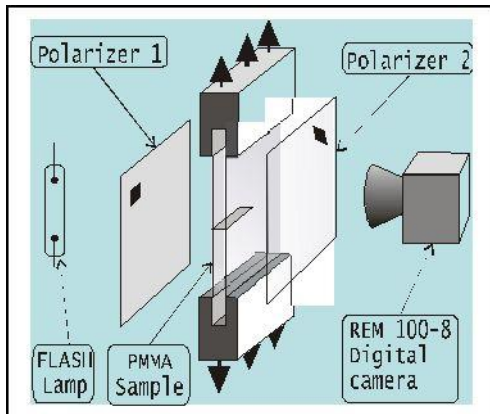


Рис. 1а. Схема эксперимента по высокоскоростной регистрации динамики трещины

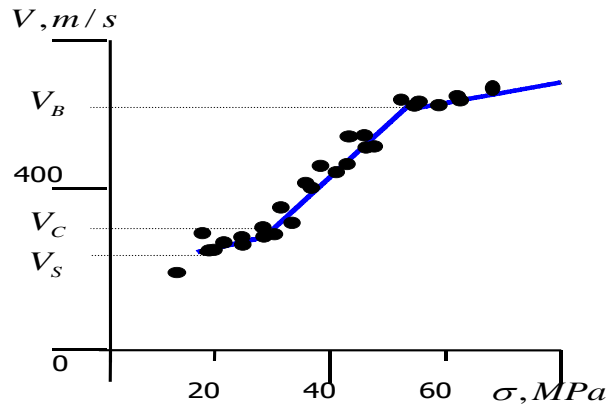


Рис. 1б. Три характерных режима динамики трещин

Вырождение статистики Пуассона в однородное распределение с размерами фрагментов, соответствующими «простой» диссипативной структуре обострения с минимальным размером пространственной локализации, позволило предложить объяснение режимов возбуждения «волн разрушения» как эффекта «замедленного разрушения» при резонансном возбуждении указанных автомодельных коллективных мод ударной волной с временами «задержки», близкими к временам обострения [Naimark, Uvarov, 2004]. Возбуждение волн разрушения может быть ассоциировано с иницированием майншока. Установленные режимы распространения трещин при взаимодействии с областями локализации повреждений позволяют предложить интерпретацию соответствующих сценариев развития разломов и иницирование ими очагов землетрясений. Принципиальное значение имеет идентификация стадийности развития разрушения в терминах динамики коллективных мод дефектов как автомодельных решений, что является основой для проведения лабораторных экспериментов с возможностью перенесения результатов на сейсмические масштабы.

### **GMS динамика стадийности разрушения и скейлинг в сейсмичности.**

Формирование коллективных мод ансамблей дефектов, имеющих природу автомодельных решений, позволяет предложить интерпретацию закономерностей скейлинга в сейсмичности, связав последние с GMS (щелевыми) состояниями нелинейной «критической» системы «твердое тело с дефектами» [Naimark, 2021]. Коллективные моды дефектов с автосолитонной и «обостряющейся» динамикой иницируют новые механизмы переноса импульса и диссипации как следствие качественного изменения дисперсионных свойств вследствие аномалий времен релаксации при подчинении динамики системы динамике коллективных мод дефектов. При этом важным является вопрос о фундаментальной природе трех широко

известных законах скейлинга [Kagan, 1994]: (i) закон Gutenberg – Richter’a, устанавливающий автомодельные закономерности для частотно-магнитудных данных землетрясений, и существование характерного времени задержки для формирования скейлинга; (ii) закон Omog<sub>i</sub> для затухания во времени скорости афтершоков, следующих за майншоком; (iii) закон Bath’a для разницы амплитуд в магнитудах майншока и афтершока с максимальной амплитудой. Уместна аналогия между распределением масштабов, соответствующих майншокам, и масштабами инициирования диссипативных структур обострения разной сложности.

*Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 20-41-596013.*

### **Литература**

- Kagan Y.Y. Observational evidence for earthquakes as nonlinear dynamic process // *Physica D*. 1994. V. 77. No 1–3. P. 160–192. DOI:[10.1016/0167-2789\(94\)90132-5](https://doi.org/10.1016/0167-2789(94)90132-5)
- Naimark O.B. Collective behavior of cracks and defects (plenary lecture) // *EUROMAT2000. Advances in Mechanical Behavior, Plasticity and Damage, Proc. Int. Symp.* / Ed.: D. Miannay, P. Costa, D. Francois, A. Pineau. Elsevier, 2000. V. 1. P. 15–28.
- Naimark O.B. Structural-scaling transitions and self-similar features of earthquake development // *Physical Mesomechanics*. 2008. V. 11. No 3–4. P. 187–201.
- Naimark O. Duality of singularities of multiscale damage localization and crack advance: length variety in Theory of Critical Distances // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2019. V. 13. No 49. P. 272–281. DOI:[10.3221/IGF-ESIS.49.27](https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.49.27)
- Naimark O.B. Defects Induced Criticality and Gapped Momentum States in Condensed Matter // *Procedia Structural Integrity*. 2021. V. 32. P. 144–151. DOI:[10.1016/j.prostr.2021.09.021](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.021)
- Naimark O.B., Bayandin Y.V., Zocher M.A. Collective properties of defects, multiscale plasticity, and shock induced phenomena in solids // *Physical Mesomechanics*. 2017. V. 20. No 1. P. 10–30. DOI:[10.1134/S1029959917010027](https://doi.org/10.1134/S1029959917010027)
- Naimark O., Bayandin Yu., Uvarov S., Bannikova I., Saveleva N. Critical Dynamics of Damage-Failure Transition in Wide Range of Load Intensity // *Acta Mechanica*. 2021. V. 232. P. 1943–1959. DOI:[10.1007/s00707-020-02922-1](https://doi.org/10.1007/s00707-020-02922-1)
- Naimark O.B., Uvarov S.V. Nonlinear Crack Dynamics and Scaling Aspects of Fracture (Experimental and Theoretical Study) // *International Journal of Fracture*. 2004. V. 128. P. 285–292. DOI:[10.1023/B:FRAC.0000040992.50470.8a](https://doi.org/10.1023/B:FRAC.0000040992.50470.8a)
- Rundle J.B., Turcotte D.L., Shcherbakov R., Klein W., Sammis C. Statistical physics approach to understanding the multiscale dynamics of earthquakes fault systems // *Reviews of Geophysics*. 2003. V. 41. No 4. P. 101–129. DOI:[10.1029/2003RG000135](https://doi.org/10.1029/2003RG000135)

## **CRITICAL DYNAMICS OF FAILURE AND SELF-SIMILAR LAWS IN SEISMICITY**

Naimark O.B.

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

*Email: [naimark@icmm.ru](mailto:naimark@icmm.ru)*



УДК 550.3+ 550.343.64

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СИСТЕМЕ «ИОНОСФЕРА-АТМОСФЕРА-ЛИТОСФЕРА» И ИХ ВОЗМОЖНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Новиков В.А.<sup>1</sup>, Сорокин В.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия

E-mail: [novikov@ihed.ras.ru](mailto:novikov@ihed.ras.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** С использованием предложенной модели генерации пульсаций геомагнитного поля рентгеновским излучением солнечной вспышки численными исследованиями показано, что сильная солнечная вспышка класса X может генерировать всплеск теллурических токов в сейсмогенных разломах. Максимальная плотность этих токов  $10^{-6}$  А/м<sup>2</sup> находится на уровне плотности тока в земной коре, создаваемого искусственным источником ( $10^{-7}$ – $10^{-8}$  А/м<sup>2</sup>) и приводящего к инициированию землетрясений и пространственно-временному перераспределению региональной сейсмичности. Таким образом, можно ожидать, что при определенных условиях (напряженно-деформированное состояние разлома, его ориентация и электропроводность) солнечная вспышка может инициировать землетрясение. В качестве верификации используемой модели рассмотрен случай возникновения двух землетрясений  $M_w > 6$  в Новой Зеландии в 2011 г. с задержкой 6 суток после солнечных вспышек класса X и M на разломе Port Hills, наиболее чувствительном к внешнему электромагнитному воздействию. На основе полученных результатов представлен возможный алгоритм краткосрочного прогноза землетрясений на основе электромагнитных триггерных эффектов, обусловленных сильными вариациями параметров космической погоды.

**Ключевые слова:** солнечная вспышка, геомагнитные пульсации, теллурические токи, сейсмогенный разлом земной коры, краткосрочный прогноз землетрясений

В работах [Новиков и др., 2023; Sorokin et al., 2019; 2023] рассмотрен возможный физический механизм инициирования землетрясений электромагнитным (ЭМ) воздействием на область подготовки землетрясения как следствие рентгеновского излучения солнечных вспышек. Данная гипотеза основана на результатах полевых наблюдений и лабораторных экспериментов по исследованию нового явления в сейсмологии – ЭМ инициирования землетрясений, как результата взаимодействия ЭМ и электрического полей с горными породами и разломами земной коры в субкритическом напряженно-деформированном состоянии [Зейгарник и др., 2022]. Результаты численных исследований, полученные с использованием физической и математической моделей процессов в ионосфере и литосфере, обусловленных солнечной вспышкой [Sorokin et al., 2023; Новиков и др., 2023], указывают на то, что после мощной солнечной вспышки класса X плотность теллурических токов в проводящем слое литосферы может достигать значений  $10^{-8}$ ... $10^{-6}$  А/м<sup>2</sup>, длительность импульса тока составляет порядка 100 с, а длительность фронта нарастания тока равна  $\sim 10$  с. Эти значения на 2...3 порядка превышают среднюю плотность

теллурических токов в литосфере [Lanzerotti, Gregori, 1986] и сопоставимы с плотностью тока, генерируемого в литосфере ( $10^{-7} \dots 10^{-8}$  А/м<sup>2</sup>) искусственными импульсными источниками электрической энергии [Зейгарник и др., 2022]. Необходимо отметить, что искусственная инжекция электрических импульсов в земную кору в сейсмоактивных районах привела к ЭМ инициированию слабых землетрясений и региональному перераспределению сейсмичности Памира и Северного Тянь-Шаня. Это означает, что солнечные вспышки, обеспечивающие плотность потока энергии свыше 0.005 Дж/м<sup>2</sup>, способны также инициировать землетрясения в сейсмоопасных районах, как и предполагалось в работе [Novikov et al., 2020]. Этот вывод подтверждается случаями наблюдения магнитных импульсов перед землетрясением [Scotville et al., 2015] аналогично полученным численным оценкам магнитных импульсов (~100 нТ), генерируемых рентгеновским излучением солнечной вспышки, и импульсов теллурического тока в проводящем слое литосферы, а также случаев резкого повышения глобальной и региональной сейсмичности (Греция) после солнечной вспышки класса X9.3, произошедшей 6 сентября 2017 г. [Novikov et al., 2020]. Этот эффект может быть положен в основу краткосрочного прогноза землетрясений с использованием уверенно регистрируемых сильных внешних ЭМ триггерных воздействий на зону подготовки землетрясений.

Концепция предсказуемости землетрясений, основанная на триггерных явлениях, была сформулирована в работе [Sobolev, 2011]. На основе наблюдений поведения сейсмичности перед сильными землетрясениями, а также лабораторных исследований отклика акустической эмиссии (трещинообразования) из образцов горных пород в субкритическом напряженно-деформированном состоянии при внешних триггерных воздействиях был предложен следующий алгоритм краткосрочного прогноза землетрясений на основе триггерных явлений:

- (а) определение объема неустойчивой зоны (системы неустойчивых зон различного масштаба);
- (б) мониторинг триггерных эффектов и оценка их воздействия на неустойчивые области;
- (с) оценка вероятности места, времени и магнитуды землетрясения.

Первый шаг (а) при таком подходе к прогнозу землетрясений может быть выполнен на основе различных методов выбора регионов с готовящимся землетрясением (например, [Sobolev, 2011; Dzeboev et al., 2021]). Для случая ЭМ воздействия на зону подготовки землетрясения в этих регионах необходимо дополнительно выбрать разломы земной коры с учетом их ориентации и электропроводности, в которых может ожидать генерация максимальных теллурических токов. Очевидно, что максимальный ток в разломе будет генерироваться в том случае, когда вектор его плотности будет параллелен направлению разлома, что приводит к концентрации тока в разломе.

Численные результаты демонстрируют [Sorokin et al., 2023], что в то время, как подсолнечная точка находится в северном полушарии, максимальные значения плотности

тока должны наблюдаться в южном полушарии, где в таком случае с большей вероятностью должен ожидаться отклик сейсмической активности на сильную солнечную вспышку. Векторы плотности тока в северном полушарии в низких и средних широтах ориентированы, в основном, в широтном, а в высоких широтах – в меридиональном направлении. В южном полушарии они ориентированы, как правило, в меридиональном направлении. Это важно при выборе регионов для статистического анализа отклика сейсмической активности на солнечные вспышки. Включение в анализ землетрясений, произошедших на разломах, нечувствительных к ЭМ воздействию солнечных вспышек с точки зрения их ориентации и электропроводности, может привести к некорректным результатам и выводам о солнечно-земных связях с точки зрения воздействия процессов на Солнце на сейсмичность Земли. При этом важным аспектом при выборе разломов земной коры, чувствительных к сильным вариациям космической погоды, кроме ориентации разломов, является их удельное электрическое сопротивление, которое обычно определяется методом магнито-теллурического (МТ) зондирования [Mackie et al., 1997]. Результаты полевых исследований показали, что разлом Сан-Андреас (Калифорния, США) [Unsworth et al., 1997] и другие основные разломы, например разлом Alpine в Новой Зеландии [Ingham, Brown, 1998] и разлом Fraser River в Британской Колумбии, Канада [Jones et al., 1992], имеют проводящие зоны с удельным сопротивлением от 0.8 до 50 Ом·м. В то же время, некоторые крупные разломы демонстрируют наличие как проводящих, так и резистивных зон [Ledo et al., 2002; Mackie et al., 1997; Stanley et al., 1990], в которых удельное сопротивление находится в диапазоне ~250...10000 Ом·м, и, следовательно, генерация импульса теллурических токов вследствие сильных вариаций параметров космической погоды, достаточного для инициирования землетрясения, маловероятна или невозможна.

Таким образом, на основе полученных численных оценок, по нашему мнению, корректный статистический корреляционный анализ солнечно-земных связей, а также алгоритм краткосрочного прогноза землетрясений с учетом ЭМ триггерных эффектов должен быть следующим:

- a) определение неустойчивой области (секции разлома земной коры), где ожидаются сильные землетрясения на основе существующих методов выбора сейсмоопасных регионов (например, [Sobolev, 2011; Dzeboev et al., 2021]);
- b) выбор разломов земной коры в регионах, определенных на этапе (a), наиболее чувствительных к электромагнитному воздействию с точки зрения их ориентации, близкой к направлению вектора плотности теллурического тока, а также их электропроводности;
- c) выборка из региональных сейсмических каталогов тех землетрясений, которые произошли на разломах, определенных на этапе (b);

d) корреляционный анализ времени возникновения землетрясения и вариаций параметров космической погоды для определения времени задержки инициирования землетрясения и пороговых значений параметров космической погоды, вызывающих триггерный эффект в зоне подготовки землетрясения.

Верификация данного подхода выполнена для региона Новой Зеландии (южное полушарие) для солнечной вспышки класса X2.2, произошедшей 15.02.2011 и вызвавшей 18.02.2011 геомагнитную бурю с индексом геомагнитной активности  $K_p = 5$ . Согласно расчетам [Sorokin et al., 2023], а также результатам изучения региональных геомагнитно-индуцированных токов вектор плотности тока в данном регионе имеет юго-западное направление и находится на уровне  $10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>, что соответствует плотности тока, создаваемой в земной коре МГД-генератором и приводящей к инициированию землетрясений на Северном Тянь-Шане [Зейгарник и др., 2022]. В данном случае вектор плотности тока совпадает с направлением простираения разлома Port Hills, что обеспечивает максимальное значение теллурических токов в разломе, которое может обладать триггерным потенциалом. На данном разломе 21.02.2011 произошло землетрясение с магнитудой  $M_w = 6.2$  с задержкой 6 суток после солнечной вспышки аналогично отклику сейсмичности на искусственные электромагнитные воздействия [Зейгарник и др., 2022]. Далее, на этом же разломе 13.06.2011 произошло еще одно землетрясение с  $M_w = 6.0$  после сильной солнечной вспышки 07.06.2011 класса M2.54 с той же задержкой 6 суток. Эти данные полевых наблюдений подтверждают возможность инициирования землетрясения сильной солнечной вспышкой и, с учетом задержки отклика сейсмичности на ЭМ воздействие в несколько суток, могут использоваться в качестве дополнительной прогностической информации в методах краткосрочного прогноза землетрясений наряду с другими известными предвестниками сильного землетрясения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание ОИВТ РАН № 075-01129-23-00 и ИЗМИРАН № 01201356396).*

### Литература

- Зейгарник В.А., Богомолов Л.И., Новиков В.А. Электромагнитное инициирование землетрясений: полевые наблюдения, лабораторные эксперименты и физические механизмы (Обзор) // Физика Земли. 2022. № 1. С. 35–66. DOI:[10.31857/S0002333722010100](https://doi.org/10.31857/S0002333722010100)
- Новиков В.А., Сорокин В.М., Яценко А.К., Мушкарев Г.Ю. Физическая модель и численные оценки теллурических токов, генерируемых рентгеновским излучением солнечной вспышки // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 1. С. 23–44. DOI:[10.26006/29490995\\_2023\\_15\\_1\\_23](https://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_1_23)
- Dzeboev B.A., Gvishiani A.D., Agayan S.M., Belov I.O., Karapetyan J.K., Dzeranov B.V., Barykina Y.V. System-Analytical Method of Earthquake-Prone Areas Recognition // Applied Sciences. 2021. V. 11. Article 7972. DOI:[10.3390/app11177972](https://doi.org/10.3390/app11177972)

- Ingham M., Brown C. A magnetotelluric study of the Alpine Fault, New Zealand // *Geophysical Journal International*. 1998. V. 2. P. 542–552. DOI:[10.1046/j.1365-246X.1998.00659.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00659.x)
- Jones A.G., Kurtz R.D., Boerner D.E., Craven J.A., McNeice G.W., Gough D.I., DeLaurier J.M., Ellis R.G. Electromagnetic constraints on strike-slip fault geometry – The Fraser River fault system // *Geology*. 1992. V. 20. No 6. P. 561–564. DOI:[10.1130/0091-7613\(1992\)020%3C0561:ecossf%3E2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020%3C0561:ecossf%3E2.3.co;2)
- Lanzerotti L.J., Gregori G.P. Telluric currents: The natural environment and interaction with man-made systems. In: *The Earth's Electrical Environment*. The National Academic Press, Washington, D.C., 1986. P. 232–257.
- Ledo J., Jones A.G., Ferguson I.J. Electromagnetic images of a strike-slip fault: The Tintina fault-Northern Canadian // *Geophysical Research Letters*. 2002. V. 29. No 8. DOI:[10.1029/2001GL013408](https://doi.org/10.1029/2001GL013408)
- Mackie R.L., Livelybrooks D.W., Madden T.R., Larsen J.C. A magnetotelluric investigation of the San Andreas Fault at Carrizo Plain, California // *Geophysical Research Letters*. 1997. V. 24. P. 1847–1850. DOI:[10.1029/97GL01604](https://doi.org/10.1029/97GL01604)
- Novikov V., Ruzhin Yu., Sorokin V., Yaschenko A. Space weather and earthquakes: possible triggering of seismic activity by strong solar flares // *Annals of Geophysics*. 2020. V. 63. No 5. PA554. DOI:[10.4401/ag-7975](https://doi.org/10.4401/ag-7975)
- Scoville J., Heraud J., Freund F. Pre-earthquake magnetic pulses // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2015. V. 15. P. 1873–1880. DOI:[10.5194/nhess-15-1873-2015](https://doi.org/10.5194/nhess-15-1873-2015)
- Sobolev G.A. Seismicity dynamics and earthquake predictability // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2011. V. 11. P. 445–458. DOI:[10.5194/nhess-11-445-2011](https://doi.org/10.5194/nhess-11-445-2011)
- Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Novikov V.A. A possible mechanism of stimulation of seismic activity by ionizing radiation of solar flares // *Earthquake Sciences*. 2019. V. 32. No 1. P. 26–34. DOI:[10.29382/eqs-2019-0026-3](https://doi.org/10.29382/eqs-2019-0026-3)
- Sorokin V., Yaschenko A., Mushkarev G., Novikov V. Telluric Currents Generated by Solar Flare Radiation: Physical Model and Numerical Estimations // *Atmosphere*. 2023. V. 14. Article 458. DOI:[10.3390/atmos14030458](https://doi.org/10.3390/atmos14030458)
- Stanley W.D., Labson V.F., Nokleberg W.J., Csejtey B., Fisher M.A. The Denali fault system and Alaska Range of Alaska: Evidence for underplated Mesozoic flysch from magnetotelluric surveys // *Bulletin of Geological Society of America*. 1990. V. 102. P. 160–173. DOI:[10.1130/0016-7606\(1990\)102%3C0160:TDFSAA%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1990)102%3C0160:TDFSAA%3E2.3.CO;2)
- Unsworth M.J., Malin P.E., Egbert G.D., Booker J.R. Internal Structure of the San Andreas Fault Zone at Parkfield, California // *Geology*. 1997. V. 25. P. 359–362. DOI:[10.1130/0091-7613\(1997\)025%3C0359:ISOTSA%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025%3C0359:ISOTSA%3E2.3.CO;2)

## ELECTROMAGNETIC TRIGGERING EFFECTS IN THE "IONOSPHERE-ATMOSPHERE-LITHOSPHERE" SYSTEM AND THEIR POSSIBLE APPLICATION FOR SHORT-TERM EARTHQUAKE PREDICTION

Novikov V.A.<sup>1</sup>, Sorokin V.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Joint Institute for High Temperatures, RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, RAS, Moscow, Russia*

E-mail: [novikov@ihed.ras.ru](mailto:novikov@ihed.ras.ru)

УДК 550.34

## ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОЙ МАГНИТУДЫ ДЛЯ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Писаренко В.Ф.<sup>1</sup>, Скоркина А.А.<sup>1</sup>, Рукавишников Т.А.<sup>1</sup>, Ружич В.В.<sup>2</sup>, Левина Е.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*

E-mail: [anna@mitp.ru](mailto:anna@mitp.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** В настоящей работе мы применили новые методы к каталогу землетрясений региона Байкальской рифтовой зоны за интервал 1963–2021 гг. с учетом таких сильных землетрясений, как Култукское (27 августа 2008 года,  $M_w = 6.3$ ) и Хубсугульское (12 января 2021 года,  $M_w = 6.8$ ). Оценена максимально возможная магнитуда  $M_{\max}$ . Кроме того, представлены оценки недавно введенного в сейсмологическую практику параметра – квантиля  $Q_q(T)$  максимального землетрясения в будущем интервале времени  $T$ , имеющего уровень  $q$ . Этот параметр является более устойчивым и стабильным по сравнению с  $M_{\max}$  и более подробно характеризует сейсмический режим в диапазоне самых больших магнитуд.

**Ключевые слова:** Байкальская рифтовая зона, максимально возможная магнитуда, квантили максимального землетрясения

Изучению структуры сейсмического поля и, в частности, определению максимальной возможной магнитуды в сейсмоактивных регионах в последнее время уделяется большое внимание [Pisarenko et al., 2010; Kijko, Singh, 2011]. Ранее для территории Байкальской рифтовой зоны была выполнена работа по оценке максимально возможной региональной магнитуды [Ружич и др., 1998]. В настоящей работе применены новые методы к каталогу землетрясений, увеличенному соответственно на интервал в 1999–2021 гг., с учетом таких сильных землетрясений, как Култукское (27 августа 2008 года,  $M_w = 6.3$ ) и Хубсугульское (12 января 2021 года,  $M_w = 6.8$ ). В работе мы использовали каталог магнитуд Байкальского филиала Единой геофизической службы РАН (БФ ФИЦ ЕГС РАН, [seis-bykl.ru](http://seis-bykl.ru)) за период 1963–2021 гг.;  $48.0 \leq \text{широта} \leq 58.93$ ;  $96.0 \leq \text{долгота} \leq 122.0$ ;  $2.6 \leq M \leq 8.2$ .

Общая схема оценивания параметра  $M_{\max}$ , предлагаемая нами, такова. Сначала рассматривается оценка параметров  $(M, \beta)$  стандартным методом правдоподобия. Обозначим имеющуюся выборку магнитуд (каталог)  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ . Функция правдоподобия имеет вид:

$$L(M, \beta | \mathbf{x}) = \prod_{k=1}^n f(x_k | M, \beta). \quad (1)$$

Как известно (см. например, [Pisarenko et al., 1996]), оценкой максимального правдоподобия для параметра  $M_{\max}$  в усеченном законе Гутенберга – Рихтера (УГР) является максимальная магнитуда наблюдаемой выборки  $\mu_n$ :

$$\mu_n = \max(x_1, \dots, x_n). \quad (2)$$

Оценка максимального правдоподобия для параметра  $\beta$  находится как максимум правдоподобия для распределения УГР (1), в котором параметр  $M$  заменен на  $\mu_n$  (2), т. е. как максимум функции от  $\beta$ :

$$L(\mu_n, \beta | \mathbf{x}) = \prod_{k=1}^n f(x_k | \mu_n, \beta).$$

Полученная оценка  $\mu_n$  максимального правдоподобия для параметра  $M$  будет иметь систематическое, отрицательное смещение относительно истинного значения параметра  $M$ , особенно сильное при умеренных значениях  $n$ . В работе [Писаренко, 2022] предложена новая оценка параметра  $M$ , заметно уменьшающая это смещение. Эта оценка, обозначаемая  $\bar{M}$ , имеет вид:

$$\bar{M} = \mu_n - \frac{1}{\beta u^n} [\log(1 - \bar{U}) + \bar{W}_n], \quad (3)$$

где  $\bar{U} = 1 - \exp[-\bar{\beta}(\mu_n - m_0)]$ ;  $\bar{W}_n = \bar{U} + \frac{\bar{U}^2}{2} + \dots + \frac{\bar{U}^n}{n}$ ;  $\bar{\beta}$  – оценка максимального правдоподобия для  $\beta$ ;  $m_0$  – нижний порог магнитуды.

В таблице наряду с новыми оценками  $M_{\max}$ , полученными по каталогу БРЗ 1963–2021 гг., приведены оценки параметра  $M_{\max}$ , основанные на палеосейсмологических данных. Также отметим, что в новых оценках увеличилась их точность определения по сравнению с результатами, полученными ранее с применением байесовского подхода [Ружич и др., 1998].

Таблица. Оценки параметра  $M_{\max}$  для Байкальской рифтовой зоны

Субрегион	Наблюденный максимум магнитуд 1963–2021 гг., $\mu_n$	Новая оценка $M_{\max}$	Оценка $M_{\max}$ по палеосейсмологическим данным	Оценка $M_{\max}$ (1998 г.)
Саяны	7.5	8.3	8.0–8.2	8.39±0.64
Байкал	7.2	7.9	7.4–7.7	7.82±0.90
Северомуйский	7.3	7.8	7.6–8.2	8.41±0.53

Мы видим, что палеосейсмологические оценки, в целом, неплохо согласуются с оценками, основанными на инструментальном каталоге 1963–2021 гг., хотя первые являются гораздо менее точными и относящимися к другой эпохе, когда сейсмический режим мог быть другим. Кроме того, например, оценка  $M_{\max} = 8–8.2$ , полученная по палеосейсмологическим данным [Чипизубов, Смекалкин, 1999], является дискуссионной [Фролова и др., 2022] и должна приниматься во внимание с осторожностью.

Отметим, что и статистические оценки параметра  $M_{\max}$  часто являются неустойчивыми и неробастными. Такой вывод можно сделать для ситуаций, когда в диапазоне сильных землетрясений нет достаточно большого числа наблюдений,

позволяющих надежно оценить хвост распределения магнитуд. С учетом этого были выдвинуты предложения характеризовать сейсмичность в диапазоне сильных землетрясений с помощью физически понятной и статистически корректной случайной величины – максимальной магнитуды землетрясения, которое произойдет в будущем интервале времени  $T$  (в данном регионе). Эту случайную величину можно характеризовать с помощью ее функции распределения или плотности, но удобнее использовать обратную функцию по отношению к функции распределения – функцию квантилей  $Q_q(T)$  с переменным уровнем  $q$ . Функция распределения и функция квантилей для непрерывного распределения однозначно определяют друг друга. Заметим, что квантиль  $Q_q(T)$  можно рассматривать как верхнюю доверительную границу для будущей максимальной в интервале  $T$  магнитуды с уровнем доверия  $q$  [Писаренко и др., 2022].

Получаем, что оценка максимального правдоподобия для параметра  $M_{\max}$  для всей зоны БРЗ велика, при этом большие значения максимальных магнитуд случаются относительно редко: максимальные магнитуды более 8.5 с вероятностью 0.95 происходят на больших интервалах времени  $T \approx 300$  лет или более. Поэтому с позиций оценки сейсмического риска параметр  $M_{\max}$  является не вполне адекватным. 95%-ная верхняя доверительная граница для максимального землетрясения существенным образом зависит от того, на какой интервал времени  $T$  мы хотим предсказать это максимальное землетрясение. Если нас интересует  $T = 10$  лет, то прогноз не превышает  $M_{\max} = 7.1$ . Но если взять большие значения  $T$  порядка 300 лет и больше, то можем получить прогноз  $M_{\max} \approx 8.0$  и более. По этой причине, по мнению авторов, для проблем оценки сейсмического риска квантили  $Q_q(T)$  гораздо адекватнее, чем параметр  $M_{\max}$ .

### Литература

- Писаренко В.Ф. Оценка параметров усеченного распределения Гутенберга – Рихтера // Физика Земли. 2022. № 1. С. 90–99. DOI: [10.31857/S0002333722010070](https://doi.org/10.31857/S0002333722010070)
- Писаренко В.Ф., Ружич В.В., Скоркина А.А., Левина Е.А. Структура сейсмического поля Байкальской рифтовой зоны // Физика Земли. 2022. № 3. С. 1–19.
- Ружич В.В., Левина Е.А., Писаренко В.Ф., Любушин А.А. Статистическая оценка максимальной возможной магнитуды землетрясения для Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 10. С. 1443–1455.
- Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 6. С. 936–941.
- Фролова Н.И., Малаева Н.С., Ружич В.В., Бержинская Л.П., Левина Е.А., Суцев С.П., Ларионов В.И., Угаров А.Н. Оценка социальных и экономических показателей сейсмического риска на примере г. Ангарск // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 2. С. 86–113.



- Kijko A., Singh M.* Statistical tools for maximum possible earthquake estimation // *Acta Geophysics*. 2011. V. 59. No 4. P. 674–700. DOI:[10.2478/s11600-011-0012-6](https://doi.org/10.2478/s11600-011-0012-6)
- Pisarenko V.F., Lyubushin A.A., Lysenko V.B., Golubeva T.V.* Hazard Parameters: Maximum Possible Magnitude and Related Parameters // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1996. V. 86. No 3. P. 691–700.
- Pisarenko V., Sornette D., Rodkin M.* Distribution of maximum earthquake magnitudes in future time intervals: application to the seismicity of Japan (1923–2007) // *Earth Planets Space*. 2010. V. 62. P. 567–578. DOI:[10.5047/eps.2010.06.003](https://doi.org/10.5047/eps.2010.06.003)

### ESTIMATION OF THE MAXIMUM POSSIBLE MAGNITUDE FOR THE BAIKALRIFT ZONE

Pisarenko V.F.<sup>1</sup>, Skorkina A.A.<sup>1</sup>, Rukavishnikova T.A.<sup>1</sup>, Ruzhich V.V.<sup>2</sup>, Levina E.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of the Earth's Crust, SB, RAS, Irkutsk, Russia*

E-mail: [anna@mitp.ru](mailto:anna@mitp.ru)

УДК 517.9+532.5+537.84

## НОВЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ С ФИЗИЧЕСКИМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ МЕТОДОМ ГАЛЕРКИНА

Подвигина О.М.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

*E-mail: [olgap@mitp.ru](mailto:olgap@mitp.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** При численном интегрировании по времени уравнений гидродинамики и магнитогиродинамики с использованием метода Галеркина возникает задача вида  $P_U(Av-f) = 0$ , где  $U$  – пространство, натянутое на базисные функции,  $P_U$  – оператор проектирования на это пространство, а  $A$  – линейный оператор. Для случая физических граничных условий, таких как прилипание для жидкости или продолжение диэлектриком для магнитного поля, в качестве базиса часто выбирают линейные комбинации полиномов Чебышева, для которого матрица оператора  $A$  может иметь достаточно сложный вид. Предлагается метод, который позволяет снизить объем вычислений, требующийся для решения таких задач.

**Ключевые слова:** метод Галеркина, уравнения гидродинамики и магнитогиродинамики, условия прилипания

Пусть  $X$  – Гильбертово пространство с базисом  $\{u_1, u_2, u_3, \dots\}$ ,  $A$  – оператор, действующий в этом пространстве, а  $f$  – элемент пространства  $X$ . Задача  $Av = f$  решена методом Галеркина, если для заданного конечного набора базисных функций  $\{u_1, u_2, \dots, u_N\}$  найдены числа  $\{c_1, c_2, \dots, c_N\}$  такие, что для суммы  $v = c_1u_1 + c_2u_2 + \dots + c_Nu_N$  скалярное произведение невязки  $Av-f$  с каждой базисной функцией из заданного набора равно нулю [Галёркин, 1915; Канторович, Крылов, 1962; Михлин, 1970; Fletcher, 1984].

Можно предложить эквивалентную формулировку метода Галеркина. Обозначим через  $U$  пространство, натянутое на базисные функции  $u_1, u_2, \dots, u_N$ , а через  $P_U$  – оператор ортогонального проектирования на это пространство. Задача  $Av = f$  решена методом Галеркина, если найдено  $v$ , принадлежащее  $U$ , для которого выполнено  $P_U(Av - f) = 0$ .

Предположим, что  $A$  – линейный оператор, существует пространство  $W$ , содержащее  $U$ , и задача  $P_U(Aw - f) = 0$ , где  $w$  принадлежит  $W$ , решается более просто, чем  $P_U(Av - f) = 0$ . Предлагаемый алгоритм состоит из двух шагов. На первом шаге решается задача  $P_U(Aw - f) = 0$ , а на втором шаге вычисляется коррекция  $q = v - w$ . Коррекция  $q$  принадлежит пространству  $W$ , и для нее выполнено  $P_U(Aq) = 0$ . Если размерность дополнения к  $U$  в  $W$  небольшая, то вычисление коррекции не требует большого количества операций, и предлагаемый двухшаговый алгоритм более эффективен, чем непосредственное решение задачи  $P_U(Av - f) = 0$ .

Рассмотрим систему уравнений, описывающих генерацию магнитного поля конвективными течениями в плоском горизонтальном слое. Она состоит из уравнения Навье –

Стокса, включающего силу Лоренца, уравнения теплопроводности и уравнения магнитной индукции, которые описывают эволюцию течения несжимаемой электропроводной жидкости, температуры и магнитного поля соответственно. Поле скорости течения  $\mathbf{V}$  и магнитное поле  $\mathbf{B}$  считаются соленоидальными. На границах слоя выполнены условия прилипания для жидкости, температура равна заданным значениям, над слоем среда является диэлектриком, а снизу – проводником. Предполагается периодичность в горизонтальных направлениях.

При численном решении этих уравнений скорость, температуру и магнитное поле записывают в виде сумм произведений тригонометрических функций по горизонтальным переменным и полиномов Чебышева по вертикальной переменной. Для простоты предположим, что интегрирование по времени производится методом Эйлера, и рассмотрим уравнение теплопроводности. Численную схему можно записать в виде  $T(t_{m+1}) = T(t_m) + \delta t P_U F(t_m)$ , где  $T(t_m)$  – температура в момент времени  $t_m$ ,  $\delta t$  – шаг по времени,  $F(t_m)$  – правая часть уравнения теплопроводности, а  $P_U$  – проектирование в пространство функций с нулевыми граничными условиями на горизонтальных границах. Базис в этом пространстве состоит из разностей полиномов Чебышева:  $u_1 = T_2 - T_0$ ,  $u_2 = T_3 - T_1$ ,  $u_3 = T_4 - T_0$  и т. д. При применении традиционного алгоритма метода Галеркина для вычисления проекции требуется решить систему линейных уравнений. При применении нового алгоритма первый шаг тривиален (поскольку оператор  $A$  – тождественный оператор), а на втором шаге мы добавляем коррекцию, которая принадлежит ортогональному дополнению к  $U$  в  $W$ . Полагая, что  $W$  натянуто на  $T_0, T_1, T_2$  и т. д., мы получаем, что ортогональное дополнение имеет размерность два и натянуто на суммы  $T_0 + T_2 + T_4 \dots$  и  $T_1 + T_3 + T_5 \dots$ . Таким образом, вычисление коррекции сводится к вычислению двух скалярных произведений.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00114, <https://rscf.ru/project/22-17-00114/>.*

### ***Литература***

- Галёркин Б.Г.* Стержни и пластинки. Ряды в некоторых вопросах упругого равновесия стержней и пластинок // Вестник инженеров. 1915. Т. 1. С. 897–908.
- Канторович Л.В., Крылов В.И.* Приближённые методы высшего анализа. Л., М: Физматгиз, 1962. 708 с.
- Михлин С.Г.* Вариационные методы в математической физике. М: Наука, 1970. 512 с.
- Fletcher C.A.J.* Computational Galerkin methods. New York: Springer-Verlag, 1984. 309 p.

## **A NEW GALERKIN ALGORITHM FOR PROBLEMS WITH PHYSICALLY REALISTIC BOUNDARY CONDITIONS**

Podvigina O.

*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

*E-mail: [olgap@mitp.ru](mailto:olgap@mitp.ru)*

УДК 550.34.06

## РАЗВИТИЕ ВЕБ-ГИС ПРОЕКТОВ ИТПЗ РАН В 2021–2023 ГГ.

Подольская Е.С., Некрасова А.К., Прохорова Т.В., Трубенков А.В., Селюцкая О.В.,  
Горшков А.И., Новикова О.В., Кособоков В.Г.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

*E-mail: [ekaterina.podolskaia@gmail.com](mailto:ekaterina.podolskaia@gmail.com)*

(устный доклад)

**Аннотация.** Представлены веб-ГИС проекты Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН. Дана характеристика актуальному тематическому содержанию и территориальному охвату результатов проектов, ведущихся в Институте. Показан опыт регистрации баз геоданных как объектов интеллектуальной собственности деятельности Института. Описаны возможности развития веб-ГИС Института в предстоящие годы.

**Ключевые слова:** веб-ГИС, землетрясения, линеаменты, сейсмогенные узлы, база геоданных, объект интеллектуальной собственности

Современные веб-ГИС ресурсы используются как источники информации и аналитики. Они предлагают возможности тематического картографирования и представляют содержание баз геоданных в визуальной форме [Мандругин, Архипенко, 2011; Advances..., 2011]. Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН развивает направление по представлению результатов исследовательских проектов в веб-ГИС форме. С начала создания веб-ГИС Института в 2019 году были сделаны и поддерживаются разделы для отображения данных по сильнейшим землетрясениям мира в глобальном масштабе, а также данных по линеаментам и сейсмогенным узлам ряда сейсмоактивных регионов мира.

Единой точкой входа для пользователя веб-ГИС является главная страница раздела «Карты и базы данных» (<https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/>), где к настоящему моменту представлены данные по двум проектам: «Экспериментальный прогноз сильнейших землетрясений мира» [Keilis-Borok, Kossobokov, 1990; Healy et al., 1992; Kossobokov, 1997; Ismail-Zadeh, Kossobokov, 2021; Kossobokov, Soloviev, 2021] и «Линеаменты и места возможного возникновения сильных землетрясений» [Gorshkov et al., 2002; 2003; 2004; 2009; 2010; 2021; Gorshkov, Gaudemer, 2019]. Вид главной страницы веб-ГИС проектов показан на рис. 1. В проекте по среднесрочному прогнозу землетрясений, ведущемуся в режиме реального времени с 1992 года, публикуются карты мира, на которых выделены актуальные в текущем полугодии области ожидаемого возникновения землетрясений из магнитудных диапазонов  $M8.0+$  и  $M7.5+$  и по мере возникновения отмечаются эпицентры всех таких событий. В проекте по линеаментам к осени 2023 года опубликованы наборы данных по Италии, Черноморско-Каспийскому региону [Новикова, Горшков, 2018], югу

Франции, Болгарии, Греции [Горшков и др., 2020] и Иберии (рис. 2). Проекты содержат описания на русском и английском языках для расширения круга возможных пользователей.

База геоданных Италии и Черноморско-Каспийского региона была зарегистрирована в качестве объекта интеллектуальной собственности Института, в 2022 году получено свидетельство Роспатента [Подольская и др., 2022]. В 2023 году подготовлены к регистрации базы геоданных Центрального Французского Массива и Иберии (юго-западная Европа), а также Болгарии и Греции (юго-восточная Европа).

Веб-ГИС построена на основе настольного и серверного решений Open Source QGIS; форматом хранения данных указанных проектов является база геоданных SpatiaLite, который характеризуется простым администрированием без использования дополнительных установок. Система представлена в докладах конференций и статьях [Подольская и др., 2021; Podolskaia et al., 2022].

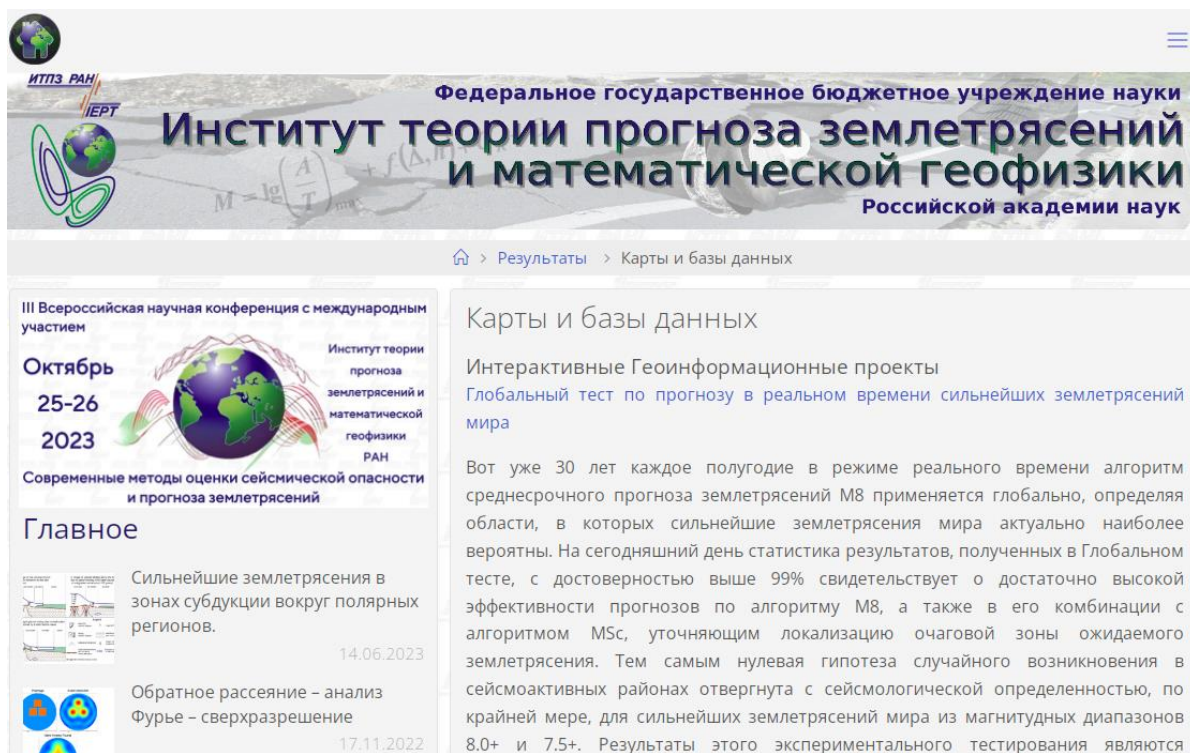


Рис. 1. Интерфейс главной страницы веб-ГИС проектов (<https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/>)

Возможности развития веб-ГИС проекта состоят в объединении и систематизации пространственных результатов, расширении функциональности и представлении пользователю аналитических инструментов. Исходя из актуальных тенденций развития геоинформатики в России, технологическим решением для веб-ГИС в ближайшие годы будет выбор между использованием зарубежных технологий с открытым кодом или отечественных разработок.

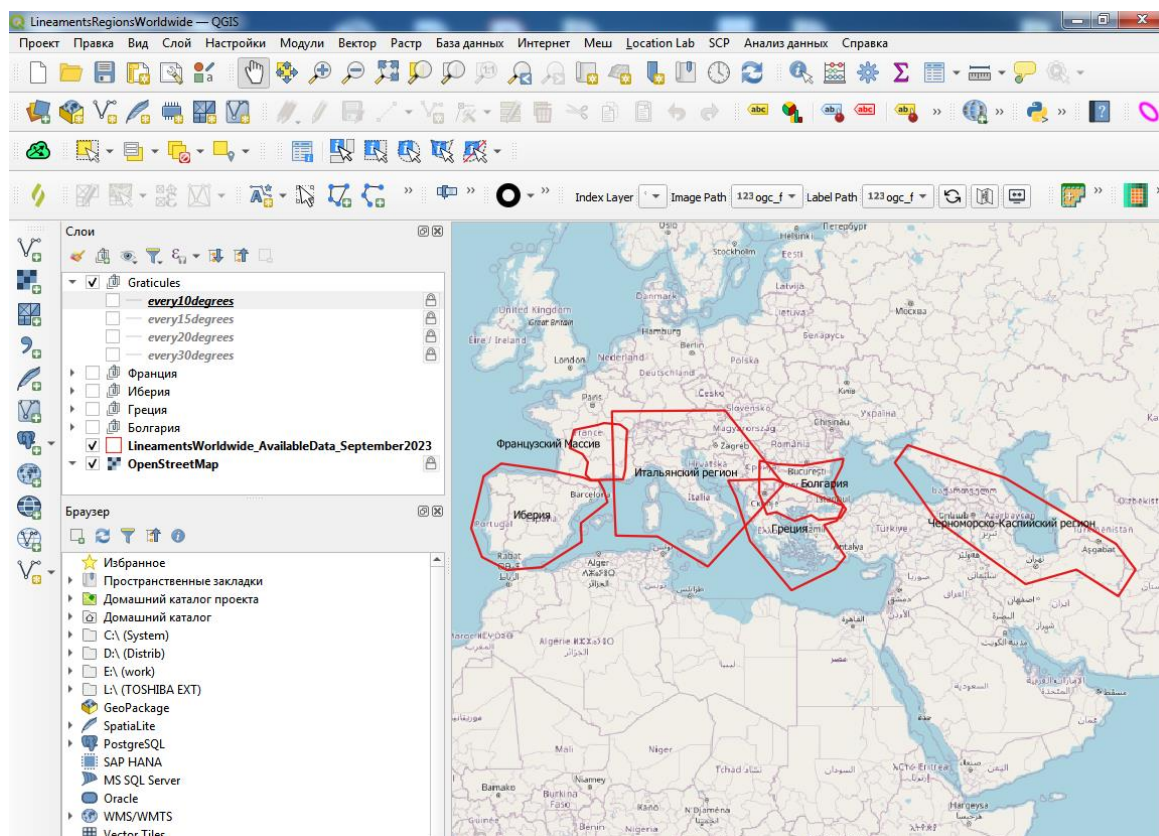


Рис. 2. Пространственный охват региональных веб-ГИС проектов по линеаментам и сейсмогенным узлам (вид подготовки публикации в настольном проекте QGIS)

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИТПЗ РАН.

### Литература

- Горшков А.И., Новикова О.В., Гаудемер И. Потенциальные места сильных ( $M \geq 7.0$ ) землетрясений в Эллинидах (Греция) // Физика Земли. 2020. № 1. С. 53–61. DOI: [10.31857/S0002333720010032](https://doi.org/10.31857/S0002333720010032)
- Мандругин В.В., Архипенко О.П. WEBGIS как результат интеграции геоинформационных систем и Интернет-технологий // Гео-Сибирь. 2011. Т. 1. № 2. С. 50–53.
- Новикова О.В., Горшков А.И. Высокосейсмичные пересечения морфоструктурных линеаментов Черноморско-Каспийского региона // Вулканология и сейсмология. 2018. № 6. С. 23–31. DOI: [10.1134/S020303061806007X1](https://doi.org/10.1134/S020303061806007X1)
- Подольская Е.С., Горшков А.И., Новикова О.В., Трубенков А.В. База геоданных сейсмогенных узлов Черноморско-Каспийского и Итальянского регионов для ГИС. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. № 2022622354. 2022.
- Подольская Е.С., Некрасова А.К., Прохорова Т.В., Трубенков А.В., Селюцкая О.В. WEB-GIS обеспечение проектов ИТПЗ РАН // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений. Тезисы докладов II Всероссийской конференции с международным участием. Москва, 2021. С. 87–88.
- Advances in Web-based GIS, Mapping Services and Applications / S. Li, S. Dragicevic and B. Veenendaal (eds.). London: CRC Press, 2011. 400 p. DOI: [10.1201/b15452](https://doi.org/10.1201/b15452)
- Gorshkov A., Gaudemer Y. Seismogenic nodes defined with pattern recognition in the French Massif Central // Journal of Iberian Geology. 2019. V. 45. P. 63–72. DOI: [10.1007/s41513-018-0087-x](https://doi.org/10.1007/s41513-018-0087-x)

- Gorshkov A., Novikova O., Dimitrova S., Soloviev A., Semka M., Dragomirov D., Tsekov M., Dimova L., Raykova R. Evaluation of the seismogenic (M6+) nodes for the territory of Bulgaria and adjacent areas // Review of the Bulgarian Geological Society. 2021. V. 82. Part 3. P. 174–176. DOI:[10.52215/rev.bgs.2021.82.3.174](https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2021.82.3.174)
- Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A. Identification of seismogenic nodes in the Alps and Dinarides // Bolletino della Societa Geologica Italiana. 2004. V. 123. P. 3–18.
- Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A. Morphostructural zonation and preliminary recognition of seismogenic nodes around the Adria margin in peninsular Italy and Sicily // JSEE: Spring. 2002. V. 4. No 1. P. 1–24.
- Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A. Recognition of the strong earthquake-prone areas (M > 6.0) within the mountain belts of Central-Europe // Revue Roumaine de Geophysique. 2003. V. 47. P. 30–41.
- Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A., Peresan A. Delineation of the geometry of the nodes in the Alps-Dinarides hinge zone and recognition of seismogenic nodes (M ≥ 6.0) // Terra Nova. 2009. V. 21. No 4. P. 257–264. DOI:[10.1111/j.1365-3121.2009.00879.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00879.x)
- Gorshkov A.I., Soloviev A.A., Jiménez M.J., García-Fernández M., Panza G.F. Recognition of earthquake-prone areas (M ≥ 5.0) in the Iberian Peninsula // Rendiconti Lincei - Scienze Fisiche e Natural. 2010. V. 21(2). P. 131–162. DOI:[10.1007/s12210-010-0075-3](https://doi.org/10.1007/s12210-010-0075-3)
- Healy J.H., Kossobokov V.G., Dewey J.W. A test to evaluate the earthquake prediction algorithm, M8 // U.S. Geological Survey. 1992. Open-File Report 92–401. DOI:[10.3133/ofr92401](https://doi.org/10.3133/ofr92401)
- Ismail-Zadeh A., Kossobokov V. Earthquake Prediction, M8 Algorithm. In: Gupta H.K. (eds) Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer. Cham. 2021. P. 204–207. DOI:[10.1007/978-3-030-58631-7\\_157](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58631-7_157)
- Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G. Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8 // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1990. V. 61. No 1–2. P. 73–83. DOI:[10.1016/0031-9201\(90\)90096-G](https://doi.org/10.1016/0031-9201(90)90096-G)
- Kossobokov V.G., Soloviev A.A. Testing Earthquake Prediction Algorithms // Journal of the Geological Society of India. 2021. V. 97. P. 1514–1519. DOI:[10.1007/s12594-021-1907-8](https://doi.org/10.1007/s12594-021-1907-8)
- Kossobokov V. User manual for M8 / Healy J.H., Keilis-Borok V.I., Lee W.H.K. (eds). Algorithms for earthquake statistics and prediction. IASPEI software library. 1997. V. 6. Seismological Society of America, ElCerrito. P. 167–221.
- Podolskaia E., Nekrasova A., Prokhorova T., Trubnikov A., Selyutskaya O. Web-gis projects at the Institute of Earthquake prediction theory and mathematical geophysics, Russian Academy of Sciences (IEPT RAS) // e-Proceedings of 8th Conference on Cartography and GIS. 2022. V. 2. P. 237–243.

### **DEVELOPMENT OF WEB-GIS PROJECTS AT THE INSTITUTE OF EARTHQUAKE PREDICTION THEORY AND MATHEMATICAL GEOPHYSICS, RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES (IEPT RAS) IN 2021-2023**

Podolskaia E.S., Nekrasova A.K., Prokhorova T.V., Trubnikov A.V., Selyutskaya O.V., Gorshkov A.I., Novikova O.V., Kossobokov V.G.

*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

E-mail: [ekaterina.podolskaia@gmail.com](mailto:ekaterina.podolskaia@gmail.com)

УДК 550.34

## СЕЙСМОТЕКТОНИКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ В РАЙОНЕ ЦАГАНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 1862 ГОДА С $M = 7.5$ (ДЕЛЬТА Р. СЕЛЕНГИ, БАЙКАЛ)

Радзиминович Н.А.<sup>1,3</sup>, Тубанов Ц.А.<sup>2,3</sup>, Санжиева Д.Б.-Д.<sup>2,3</sup>, Смекалин О.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

<sup>3</sup> Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Улан-Удэ, Россия

E-mail: [nradzim@crust.irk.ru](mailto:nradzim@crust.irk.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** Одним из сильнейших землетрясений Байкальского рифта является Цаганское событие 1862 г. с  $M = 7.5$ , в результате которого образовался залив Провал (район дельты р. Селенги). Однако до сих пор вопрос о сейсмогенной структуре, способной генерировать события такой магнитуды, остается открытым. В данной работе анализируется сейсмичность за инструментальный период наблюдений с целью более ясного понимания сейсмотектоники данного района.

**Ключевые слова:** Байкальский рифт, землетрясение, разлом

Цаганское землетрясение 12 января 1862 г. (по новому стилю) с  $M = 7.5$  и интенсивностью в эпицентре 10 баллов является одним из сильнейших в Байкальском рифте. Это землетрясение известно тем, что с ним связано образование залива Провал на восточном берегу оз. Байкал в результате постепенного опускания и затопления Цаганской степи площадью чуть более 200 км<sup>2</sup>. Это единственное известное землетрясение в Байкальском регионе, в результате которого были жертвы: сообщалось о трех погибших. Интенсивность сотрясений в Иркутске, расположенном на расстоянии ~170 км, оценивается в 8 баллов, в Верхнеудинске (Улан-Удэ) на расстоянии ~85 км в 7 баллов [Голенецкий, 1996]. Землетрясение предварялось форшоками, сильнейший из которых, с  $M = 6.5$ , произошел 11 января, а также сопровождалось афтершоками, сообщения о которых продолжали поступать, по меньшей мере, до мая 1864 г. [Голенецкий, 1996]. Магнитуда афтершоков, по-видимому, не превышала 5.5 [Новый каталог..., 1977].

Несмотря на то, что данное землетрясение и его последствия были достаточно полно описаны «по горячим следам», а также изучены сейсмогеологическими методами в настоящее время, положение его эпицентра достоверно не локализовано, соответственно, остаются противоречия в установлении разлома, по которому в результате подвижки оно произошло. Очаговая зона землетрясения разными авторами связывается либо с разломом, протягивающимся в акватории озера вдоль его восточного борта (называемым в ряде работ Морским), либо же с Дельтовым разломом, секущим дельту в СВ направлении (напр., [Хромовских, 1965; Сейсмогеология..., 1981; Чипизубов и др., 2018]). Дельтовый разлом пересекается поперечным Фофановским разломом, разделяясь на западный и восточный



сегмент. Именно восточный сегмент отождествляется с сейсмодислокацией Цаганского землетрясения. Среди исследователей нет также согласованности по кинематике движений по Дельтовому разлому, которая определяется либо как сбросовая, либо взбросонадвигающая, а также по периоду повторяемости подобных катастрофических событий: раз в 500 лет [Смекалин, Ескин, 2021] или 1100–1200 лет [Лунина и др., 2012]. Таким образом, вопрос о сейсмогенной структуре, способной генерировать землетрясения с  $M > 7$ , остается открытым.

В данной работе для лучшего понимания сеймотектонической ситуации в области Цаганского землетрясения мы рассматриваем сейсмичность Усть-Селенгинской депрессии и прилегающих районов Южно-Байкальской впадины за инструментальный период наблюдений (с 1959 г.). Мониторинг сейсмичности в настоящее время ведется региональной сетью станций Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН и локальной сетью Бурятского филиала на восточном борту впадины, что позволяет включить в анализ слабые землетрясения (с представительного класса  $K_p \geq 6.0$ ). Высокая сейсмическая активность региона находит свое отражение не только в возникновении здесь сильных землетрясений, но и в большом количестве слабых толчков. Этот район выделяется повышенным значением угла наклона графика повторяемости в пределах всей Южно-Байкальской впадины [Radziminovich et al., 2019]. За период цифровой регистрации с 2000 г. оно составляет  $\gamma = -0.54 \pm 0.01$  (без учета афтершоков сильнейшего за этот период Кударинского землетрясения с  $M = 5.5$ ).

Распределение эпицентров стабильно во времени и образует несколько зон, вытянутых вдоль основных структур. В пределах сухопутной части дельты выделяется полоса эпицентров, протягивающаяся в СВ направлении от Посольского сора до основного русла р. Селенги, контролируемого поперечным Фофановским разломом, и приуроченная к западному сегменту Дельтового разлома (рис. 1). Эта полоса эпицентров диагонально сечет Творогово-Истокское поднятие, при этом в самой полосе можно выделить области большего скопления эпицентров по ее краям и пониженную их плотность в центре. Рутинные определения глубин и результаты релокализации гипоцентров показывают заглубление очагов до 30–40 км в пределах этой полосы по сравнению с другими зонами, где сейсмоактивный слой ограничен глубинами 22–25 км. Поперечный разрез через этот сегмент разлома, построенный по данным локального каталога для гипоцентров с вертикальной ошибкой менее 5 км и контролем близкой станции (эпицентральное расстояние менее 25 км), показал падение плоскости, содержащей гипоцентры, на ЮВ, под борт впадины, что совпадает с тектоническим перекосом поднятия и данными приповерхностной геофизики. Однако такое падение противоречит геолого-структурным данным для восточного «цаганского» сегмента разлома, согласно которым блок опустился по системе сбросов

с падением на СЗ [Лунина и др., 2012]. Сам восточный сегмент в настоящее время малоактивен и практически не выражен в эпицентральной поле. Другая, более мощная (шириной 20–30 км) полоса эпицентров кулисообразно подставляет зону вдоль западного сегмента Дельтового разлома и протягивается от СВ края дельты вдоль восточного борта Южно-Байкальской впадины. В ее пределах произошли землетрясения гораздо большей силы, в том числе Среднебайкальское 1959 г. с  $M_{LN} = 6.8$  и Кударинское 2020 г. с  $M_w = 5.5$ . Следует отметить, что по простиранию эта полоса не следует положению Сахалин-Энхалуковского разлома, ограничивающего залив Провал с моря, а несколько отклоняется к северу. В работе [Суворов, Тубанов, 2008] для землетрясений этой полосы эпицентров поперечные разрезы также показали заглубление гипоцентров в ЮВ направлении, т. е. падение условной плоскости с гипоцентрами под борт впадины, что может свидетельствовать об активности внутривпадинного разлома (или серии разломов), нежели бортового. Обе эти зоны эпицентров ограничиваются поперечным Фофановским разломом, вывод об активности которого косвенно подтверждается картой плотности эпицентров.

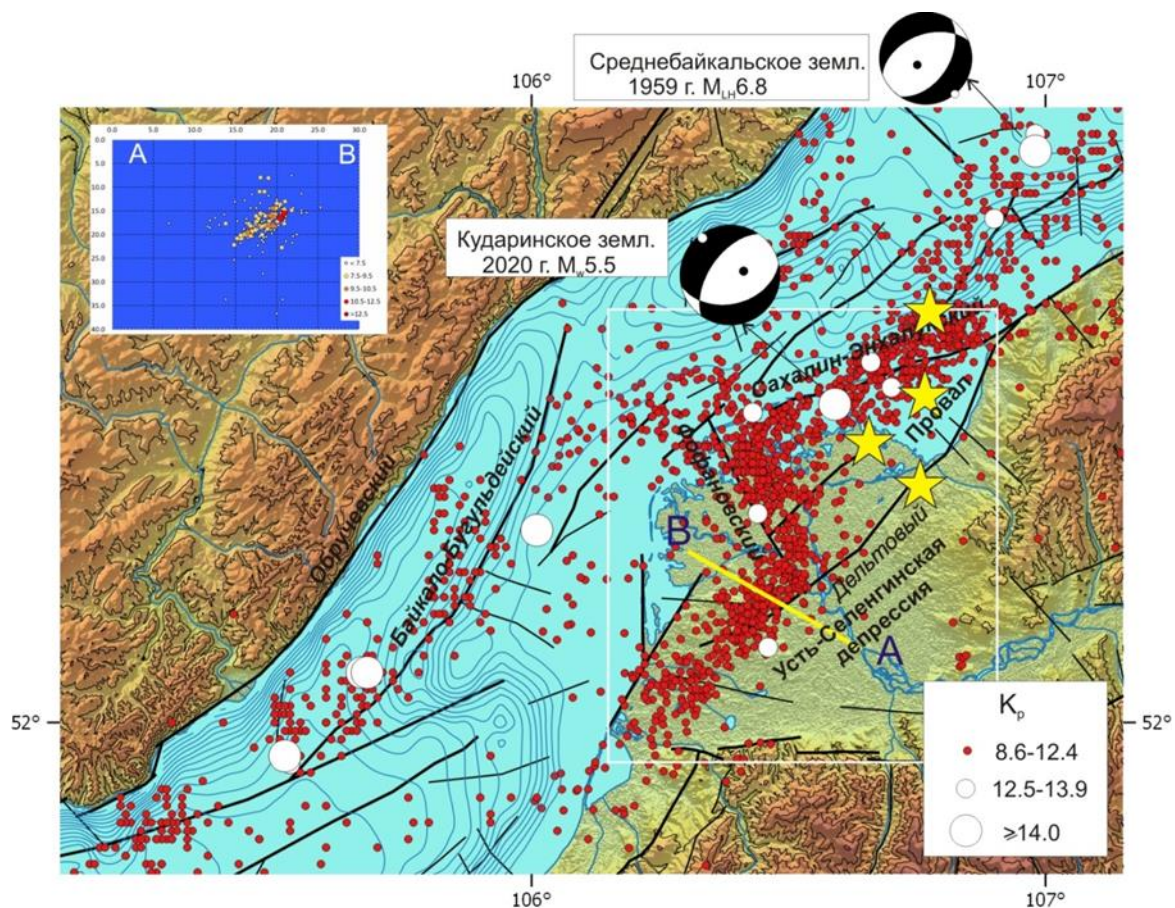


Рис. 1. Карта эпицентров дельты Усть-Селенгинской депрессии и прилегающих районов Южно-Байкальской впадины по данным каталогов Байкальского и Бурятского филиалов ФИЦ ЕГС РАН. Для района, выделенного прямоугольником, эпицентры показаны для землетрясений с  $K \geq 6.0$ . Черные линии – разломы по [Лунина, 2016]. Желтые звезды показывают местоположение эпицентра Цаганского землетрясения по данным разных авторов. Механизмы очагов сильнейших землетрясений за инструментальный период приведены в нижней полусфере: для Среднебайкальского землетрясения по [Мишарина, 1972], для Кударинского землетрясения по GCMT

Кинематика смещений в очагах землетрясений рассматриваемого района в подавляющем большинстве случаев сбросового типа, включая сильнейшие толчки. Поле тектонических напряжений, восстановленное по фокальным решениям, представлено режимом «чистого» растяжения с осью минимального сжатия ориентированной  $312^\circ$ . Сбросы реализуются по плоскостям СВ простирания, т. е. вдоль основных структур.

Анализ распределения сейсмичности за инструментальный период показывает, что все относительно сильные землетрясения произошли в пределах акватории озера, вне сухопутной части дельты. Очаг сильнейшего Среднебайкальского землетрясения локализован в Центральной котловине Южно-Байкальской впадины, к СВ от залива Провал [Солоненко, Тресков, 1960]. При этом поверхностные косейсмические деформации очень схожи с эффектами Цаганского землетрясения. При обоих событиях произошло опускание блоков земной коры, на берегу наблюдались провалы и разжижение грунта, а также трещины и разрывы, следовательно, чтобы объяснить наблюдаемые эффекты толчка 1862 г. в пределах бывшей Цаганской степи, очаг не обязательно должен находиться в ее пределах. Более того, Цаганское землетрясение привело к цунами, причем волна имела максимальный эффект в СВ углу Цаганской степи (залива Провал), ближе к очагу Среднебайкальского толчка [Демин, 2005], т. е. можно предположить, что эпицентр Цаганского события принадлежит крупной эпицентральной зоне, протягивающейся вдоль восточного борта впадины. К этой же зоне предположительно приурочено историческое событие 1903 г. с  $M = 6.7$ , а в 2020 г. Кударинское землетрясение с  $M_w = 5.5$ , и его афтершоки продлили эту зону на юго-запад [Тубанов и др., 2021]. Что касается восточного сегмента Дельтового разлома, то, очевидно, он был активизирован во время Цаганских событий. Интригующим остается его «молчание» за инструментальный период. Таким образом, основная активность и опускание дна Байкала в рассматриваемом районе связаны с внутривпадинной разломной зоной, протягивающейся вдоль восточного борта. Выявленное падение условных плоскостей с гипоцентрами на ЮВ, под борт впадины, требует уточнения и построения новых блоково-разломных моделей района.

*Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».*

### **Литература**

- Голенецкий С.И. Макросейсмические проявления катастрофического Цаганского землетрясения 1862 г. на Байкале // Физика Земли. 1996. № 11. С. 3–13.
- Демин Э.В. Антология Провала: исторические материалы о катастрофическом Цаганском землетрясении 1862 г. – Провале на Байкале. Улан-Удэ: 2005. 296 с.

- Лунина О.В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры Юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 407–434. DOI:[10.5800/GT-2016-7-3-0215](https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215)
- Лунина О.В., Андреев А.В., Гладков А.С. По следам Цаганского землетрясения 1862 г. на Байкале: результаты исследования вторичных косейсмических деформаций в рыхлых осадках // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 6. С. 775–796.
- Мишарина Л.А. Напряжения в очагах землетрясений Монголо-Байкальской зоны // Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. С. 161–171.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. 536 с.
- Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, 1981. 168 с.
- Смекалин О.П., Ескин А.Ю. Палеосейсмологические исследования в дельте Селенги (озеро Байкал) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2021. Т. 48. № 2. С. 5–23. DOI:[10.21455/VIS2021.2-1](https://doi.org/10.21455/VIS2021.2-1)
- Солоненко В.П., Тресков А.А. Среднебайкальское землетрясение 29 августа 1959 г. Иркутск: Иркут. кн. изд-во, 1960. 36 с.
- Суворов В.Д., Тубанов Ц.А. Распределение очагов близких землетрясений в земной коре под центральным Байкалом // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 8. С. 805–818.
- Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д., Кобелева Е.А., Предеин П.А., Цыдыпова Л.Р. Кударинское землетрясение 09.12.2020 г. ( $M_w=5.5$ ) на озере Байкал: результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2021. Т. 48. № 4. С. 32–47. DOI:[10.21455/VIS2021.4-2](https://doi.org/10.21455/VIS2021.4-2)
- Хромовских В.С. Детальное сейсмическое районирование дельты реки Селенги и прилегающих территорий // Геология и геофизика. 1965. № 6. С. 17–34.
- Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Имаев В.С., Гриб Н.Н., Сясько А.А., Качаев А.В. О локализации очаговой зоны Цаганского землетрясения ( $M = 7.5$ ) 1862 года // Геодинамика и минерагения Северной и Центральной Азии. Улан-Удэ: БГУ, 2018. С. 395–397.
- Radziminovich N.A., Miroshnichenko A.I., Zuev F.L. Magnitude of completeness, b-value, and spatial correlation dimension of earthquakes in the South Baikal Basin, Baikal Rift System // Tectonophysics. 2019. V. 759. P. 44–57. DOI:[10.1016/j.tecto.2019.04.002](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.04.002)

## SEISMOTECTONICS AND SEISMICITY IN THE 1862 $M = 7.5$ TSAGAN EARTHQUAKE AREA (SELENGA DELTA, LAKE BAIKAL)

Radziminovich N.A.<sup>1,3</sup>, Tubanov Ts.A.<sup>2,3</sup>, Sanzhieva D.P.-D.<sup>2,3</sup>, Smekalin O.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia

<sup>3</sup> Buryatia Branch of GS RAS, Ulan-Ude, Russia

E-mail: [nradzim@crust.irk.ru](mailto:nradzim@crust.irk.ru)

УДК 550.348

## БЫСТРИНСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 21.09.2020: НОВЫЙ ИМПУЛЬС МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Радзиминович Я.Б.<sup>1,2</sup>, Новопашина А.В.<sup>3</sup>, Лухнева О.Ф.<sup>4</sup>, Гилёва Н.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Байкальский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

<sup>4</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

E-mail: [yan.radziminovich@gmail.com](mailto:yan.radziminovich@gmail.com)

(устный доклад)

**Аннотация.** В работе рассматриваются данные об ощутимых эффектах Быстринского землетрясения 21.09.2020 ( $M_w = 5.6$ ), а также значение этого события для дальнейших макросейсмических исследований в Восточной Сибири. Наибольшая эффективность сбора данных достигнута при использовании интернет-опросника, позволившего получить 2733 отклика с полезной информацией. Макросейсмические данные, собранные различными способами, позволили оценить интенсивность сотрясений в 263 населенных пунктах, включая крупные города Южного Прибайкалья. Изучение Быстринского землетрясения открывает новые перспективы использования макросейсмических данных и придает новый импульс этому направлению исследований.

**Ключевые слова:** макросейсмические данные, землетрясение, интенсивность сотрясений, Южное Прибайкалье

Быстринское землетрясение ( $M_w = 5.6$ ), произошедшее 21.09.2020 в восточной части Тункинской системы впадин (юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны) и получившее название по ближайшей к эпицентру д. Быстрая, стало одним из наиболее значимых сейсмических событий Южного Прибайкалья за последние десятилетия. Во-первых, очаг землетрясения был приурочен к зоне сейсмического затишья, долгое время не проявлявшей сейсмической активности [Filippova et al., 2022]. Во-вторых, землетрясение дало возможность собрать беспрецедентное для региона количество макросейсмических данных. Отметим, что в силу относительной редкости сильных землетрясений в пределах юго-западного фланга БРЗ объем детальной макросейсмической информации, необходимой для разработки реалистичных сценариев сейсмического воздействия на урбанизированные территории юга Восточной Сибири, все еще остается недостаточным. В-третьих, Быстринское землетрясение позволило в жестких условиях протестировать интернет-опросник, размещенный на интернет-сайте Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (<http://seis-bykl.ru>), а также оценить эффективность его использования.

Макросейсмические данные о Быстринском землетрясении были собраны несколькими способами. В первые дни после землетрясения было выполнено полевое

макросейсмическое обследование ближайших к эпицентру населенных пунктов, имевшее, однако, ограниченный характер в связи с пандемией COVID-19 и необходимостью сокращения социальных контактов. Часть данных была собрана посредством почтовой рассылки опросных листов в местные органы власти; небольшое количество информации поступило от сотрудников сейсмических станций региональной сети. Основным объемом данных был получен посредством интернет-опросника.

Несмотря на ночное местное время (02 ч 04 мин 22.09.2020 UTC+8), первые отклики респондентов поступили менее чем через 3 минуты после возникновения толчка. В связи с резким ростом количества обращений к сайту сразу после землетрясения сервер был перегружен запросами, что привело к нарушениям в его работе. Технические сбои оказали прямое влияние на динамику поступления откликов респондентов и их количество в первые часы после землетрясения. В течение восьми часов поступило лишь 597 откликов, что было заметно ниже наших ожиданий. С целью интенсификации процесса поступления откликов, мы посредством мессенджера Viber осуществили рассылку прямого обращения к жителям Южного Прибайкалья с просьбой заполнить опросный лист. Эти действия позволили значительно улучшить ситуацию с поступлением откликов и в несколько раз увеличить их количество (рис. 1). В течение первых суток после землетрясения был получен 2721 отклик, с учетом последующего времени общее количество откликов составило 3013, из них 2733 содержали полезную информацию и были использованы в дальнейшем анализе. Из этого количества более половины откликов (1449) приходится на г. Иркутск. Отметим, что использование социальных сетей для повышения эффективности сбора макросейсмических данных также продемонстрировало отличные результаты при обследовании некоторых землетрясений на территории Европы [Szanyi *et al.*, 2014; Saraò *et al.*, 2023].

В итоге с использованием интернет-опросника были собраны макросейсмические данные из 228 населенных пунктов, что позволяет считать этот метод наиболее эффективным как в количественном отношении, так и в аспекте информативности и пространственного охвата. Информация из 29 пунктов была получена посредством почтовой рассылки опросных листов; данные из 6 пунктов поступили от сотрудников сейсмических станций региональной сети. В трех населенных пунктах (Быстрая, Култук, Тибельти) данные, полученные дистанционно, были подтверждены в ходе полевого макросейсмического обследования. Таким образом, мы располагаем данными, позволяющими оценить интенсивность сотрясений в 263 населенных пунктах.

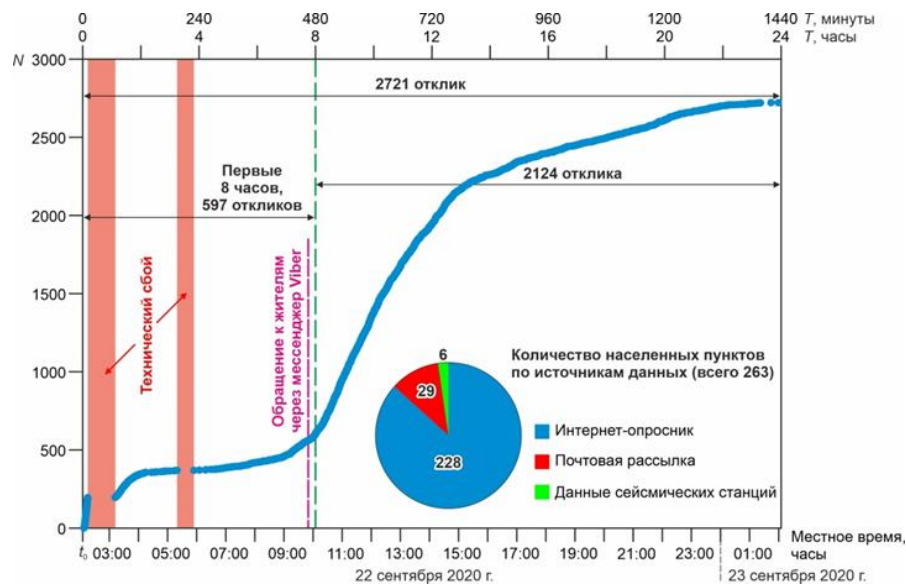


Рис. 1. Динамика поступления откликов респондентов после Быстринского землетрясения 21.09.2020. Круговая диаграмма показывает распределение количества населенных пунктов по способу сбора макросейсмических данных.  $N$  – количество откликов;  $t_0$  – момент возникновения землетрясения

Наибольшая интенсивность сотрясений при Быстринском землетрясении наблюдалась в ближайших к эпицентру населенных пунктах – д. Быстрая (VI–VII баллов), с. Тибельти (VI баллов) и п. Култук (VI–VII баллов) – на эпицентральных расстояниях от 5 до 21 км. Макросейсмические эффекты, соответствующие интенсивности сотрясений V баллов, зарегистрированы в 48 населенных пунктах, расположенных на расстоянии от 23 до 181 км. В 81 населенном пункте в диапазоне эпицентральных расстояний 49–421 км интенсивность сотрясений определяется менее уверенно и может быть оценена в IV–V баллов. Эффекты землетрясения, соответствующие интенсивности IV балла, отмечены в 106 населенных пунктах на эпицентральных расстояниях от 52 до 554 км. Наиболее удаленным пунктом, в котором Быстринское землетрясение вызвало ощутимые эффекты, является город Усть-Илимск (III балла;  $\Delta = 692$  км). На основе всех собранных макросейсмических данных мы построили карту типа «пункты – баллы», представленную на рис. 2.

Анализ макросейсмических данных о Быстринском землетрясении 21.09.2020 ( $M_w = 5.6$ ) позволяет рассматривать его как одно из наиболее значимых событий в сейсмической истории Южного Прибайкалья. Для такого утверждения есть все основания, несмотря на то, что в регионе известны сейсмические события с более высокой магнитудой и более разрушительными последствиями. Важное значение имеет большой объем собранных данных, в несколько раз превышающий количество материалов о предшествующих сейсмических событиях, что открывает новые перспективы в макросейсмических исследованиях в Восточной Сибири. В частности, появилась возможность зонирования территории крупных

городов по наблюдаемой интенсивности сотрясений с выделением меньших по площади участков [Радзиминович и др., 2022].

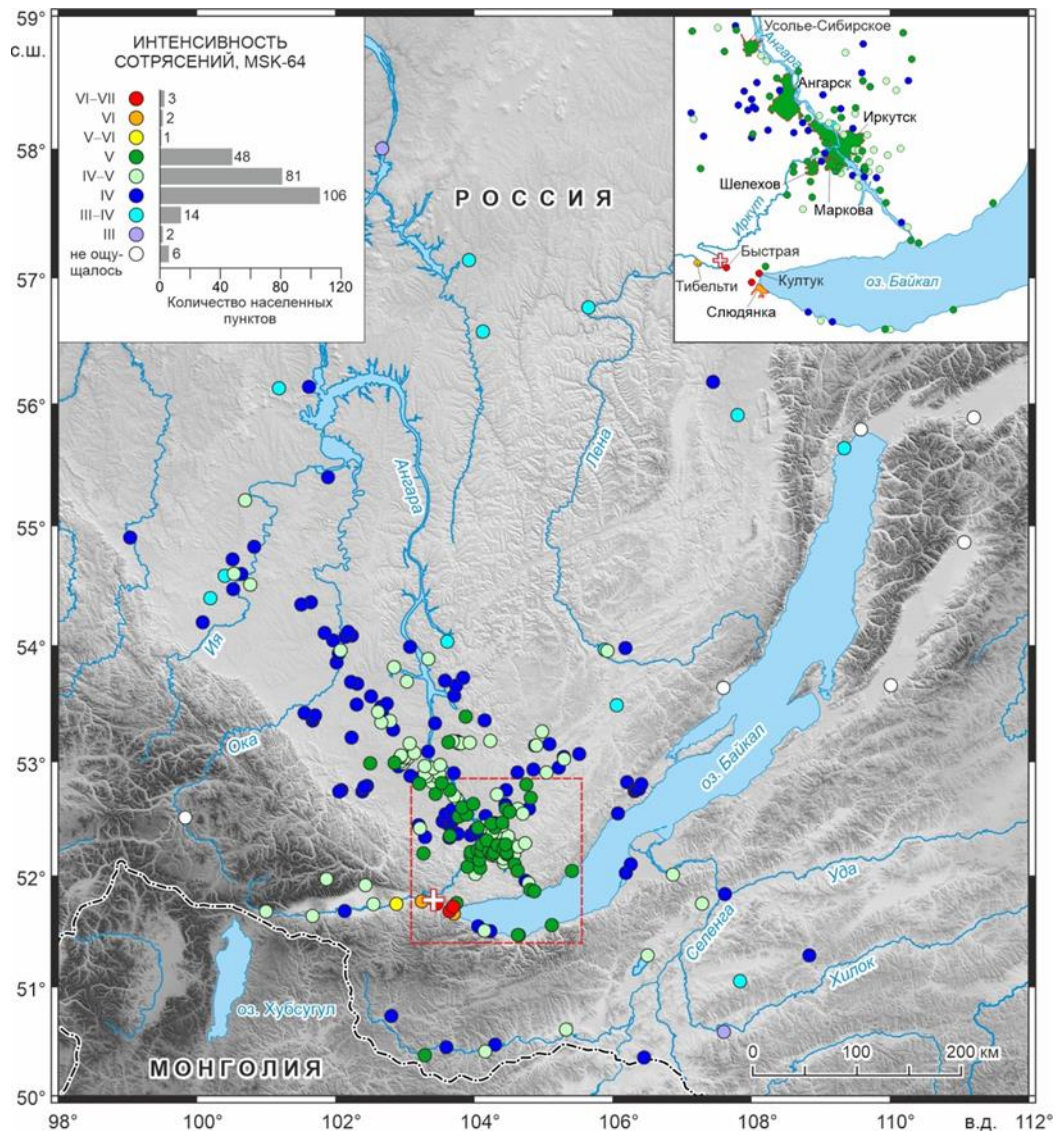


Рис. 2. Карта макросейсмических проявлений Быстринского землетрясения 21.09.2020. На врезке показано расположение крупных городов Южного Прибайкалья и населенных пунктов ближней зоны

Кроме того, полученная информация позволяет расширить диапазон эффектов землетрясений, которые в настоящее время остаются малоисследованными и на которые следует обращать более пристальное внимание в будущем. Среди них особое значение имеют долгосрочные социально-психологические последствия сейсмических воздействий, оказывающие негативное влияние на жизнь общества в целом [Лухнева и др., 2022]. Землетрясение вызвало весьма широкий общественный резонанс, что, в свою очередь, заметно повысило интерес жителей региона к актуальной сейсмологической информации и создало предпосылки для обратной связи между обществом и сейсмологами. Это позволяет надеяться на дальнейшее улучшение ситуации с макросейсмическими данными в Восточной



Сибири как в количественном, так и в качественном отношении. Использование современных методов сбора оперативной макросейсмической информации, успешно апробированных при изучении Быстринского землетрясения, открывает широкие перспективы и знаменует новый этап макросейсмических исследований в Восточной Сибири.

### *Литература*

- Лухнева О.Ф., Киселева И.Н., Радзиминович Я.Б., Новопашина А.В. Возникновение сенсорных аббераций у жителей Восточной Сибири при повторяющихся сейсмических воздействиях // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 3. С. 39–51. DOI:[10.21455/GPB2022.3-5](https://doi.org/10.21455/GPB2022.3-5)
- Радзиминович Я.Б., Новопашина А.В., Лухнева О.Ф., Кадетова А.В., Гилёва Н.А. Детальное макросейсмическое обследование и рациональный подход к оценке интенсивности сотрясений на территории крупного города (на примере последствий Быстринского землетрясения 21.09.2020 г. в Иркутске) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2022. Т. 49. № 1. С. 34–51. DOI:[10.21455/VIS2022.1-3](https://doi.org/10.21455/VIS2022.1-3)
- Filippova A.I., Bukchin B.G., Fomochkina A.S., Melnikova V.I., Radziminovich Y.B., Gileva N.A. Source process of the September 21, 2020  $M_w$  5.6 Bystraya earthquake at the South-Eastern segment of the Main Sayan fault (Eastern Siberia, Russia) // Tectonophysics. 2022. V. 822. Article 229162. DOI:[10.1016/j.tecto.2021.229162](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229162)
- Saraò A., Tamaro A., Sandron D., Slejko D., Rebez A. On the crowdsourcing of macroseismic data to characterize geological settings // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2023. V. 96. Article 103934. DOI:[10.1016/j.ijdr.2023.103934](https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103934)
- Szanyi G., Gráczér Z., Gyóri E. Macroseismic intensity data of the 22 April 2013 Tenk (Hungary) earthquake // Acta Geodaetica et Geophysica. 2014. V. 49. P. 283–294. DOI:[10.1007/s40328-014-0060-x](https://doi.org/10.1007/s40328-014-0060-x)

### **THE SEPTEMBER 21, 2020 BYSTRAYA EARTHQUAKE: A NEW IMPETUS FOR MACROSEISMOLOGY IN EASTERN SIBERIA**

**Radziminovich Ya.B.<sup>1,2</sup>, Novopashina A.V.<sup>3</sup>, Likhneva O.F.<sup>4</sup>, Gileva N.A.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Baikal Branch of the Federal Research Center «Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences», Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

<sup>4</sup> *Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the RAS, Irkutsk, Russia*

*E-mail: [yan.radziminovich@gmail.com](mailto:yan.radziminovich@gmail.com)*

УДК 550.34

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ФУНКЦИЙ ПРИЕМНИКА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГЛУБИННОГО СКОРОСТНОГО РАЗРЕЗА В РАЙОНЕ АВАЧИНСКОЙ БУХТЫ (КАМЧАТКА)

Резниченко Р.А., Гоев А.Г.

*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН,  
г. Москва, Россия*

*E-mail: [reznichenkora@yandex.ru](mailto:reznichenkora@yandex.ru)*

(стендовый доклад)

**Аннотация.** В работе представлены глубинные скоростные модели строения земной коры и верхней мантии в районе Авачинской бухты на полуострове Камчатка, полученные методом функций приемника. На основе анализа  $P$ -функций приемника эмпирически показана возможность использования методики в регионе исследования. Мощность коры оценена значением около 35 км. Выявлена сложная структура перехода кора – мантия, а также пониженные значения сейсмических скоростей в районе Авачинской бухты.

**Ключевые слова:** сейсмология, Камчатка, PRF, SRF, глубинное строение, зона субдукции

Изучение активных континентальных окраин, таких как п-ов Камчатка, является принципиально важным для понимания как современных, так и древних геодинамических процессов, происходящих в Земле. Наблюдательная сеть широкополосных сейсмических станций КФ ФИЦ ЕГС РАН (Камчатский филиал Единой геофизической службы РАН) предоставляет возможность проводить исследования глубинного строения территории сейсмологическими методами и, в частности, методом функций приемника [Винник, 2019], получившим в последние десятилетия широкое распространение. При этом до настоящего момента его использование для п-ова Камчатка было весьма ограничено. В работе использованы данные трех компактно расположенных в районе Авачинской бухты широкополосных сейсмических станций – IVS, DAL и PET.

В основе метода функций приемника лежит интерпретация обменных волн, образованных на сейсмических границах при прохождении через них волн удаленных сейсмических событий. Метод обычно характеризуют по типу основной падающей волны и возникающих обменных фаз.  $P$ -функция приемника (Receiver function, PRF) представляет собой волновую форму поперечных обменных волны, генерируемых телесеismicкой  $P$ -волной (обмен  $P$  в  $S$ ,  $P_s$ ).  $S$ -функция приемника (Sreceiver function, SRF) образуется при конверсии волны телесеismicкой поперечной волны в продольную. Наиболее устойчивый скоростной разрез земной коры и верхней мантии получается при совместной интерпретации функций приемника обоих типов [Farra, Vinnik, 2000]. При этом возможность применения методики для зоны субдукции нуждается в подтверждении, т.к. при решении задачи восстановления глубинного скоростного строения среда представляется горизонтально

слоистой пачкой, что явно не выполняется для Камчатки ввиду наличия погружающегося слэба, представляющего собой наклонный слой с повышенными значениями сейсмических скоростей.

Чтобы выявить степень влияния слэба на анализируемые данные мы вычислили две группы функций приёмника. Для расчёта первой мы использовали события, в которых сейсмические волны прошли через погружающуюся океаническую плиту, а для второй – нет (рис. 1). В первую группу было отобрано 215 PRF и 90 SRF, во вторую – 359 PRF и 410 SRF. Показано, что обменные и кратные волны, образованные на границах высокоскоростного слоя, существенно искажают форму  $P$ -приёмных функций начиная приблизительно с 30 секунды после вступления основной фазы. Существенного влияния субдуцирующей плиты на записи  $S$ -функций приёмника не выявлено (рис. 2). Это эмпирически подтверждает применимость метода функций приёмника для восстановления глубинных скоростных моделей изучаемой среды. При этом сейсмический шум, вызванный океанической плитой, ограничивает максимальную глубину таких моделей величиной около 200–250 км в изучаемом районе.

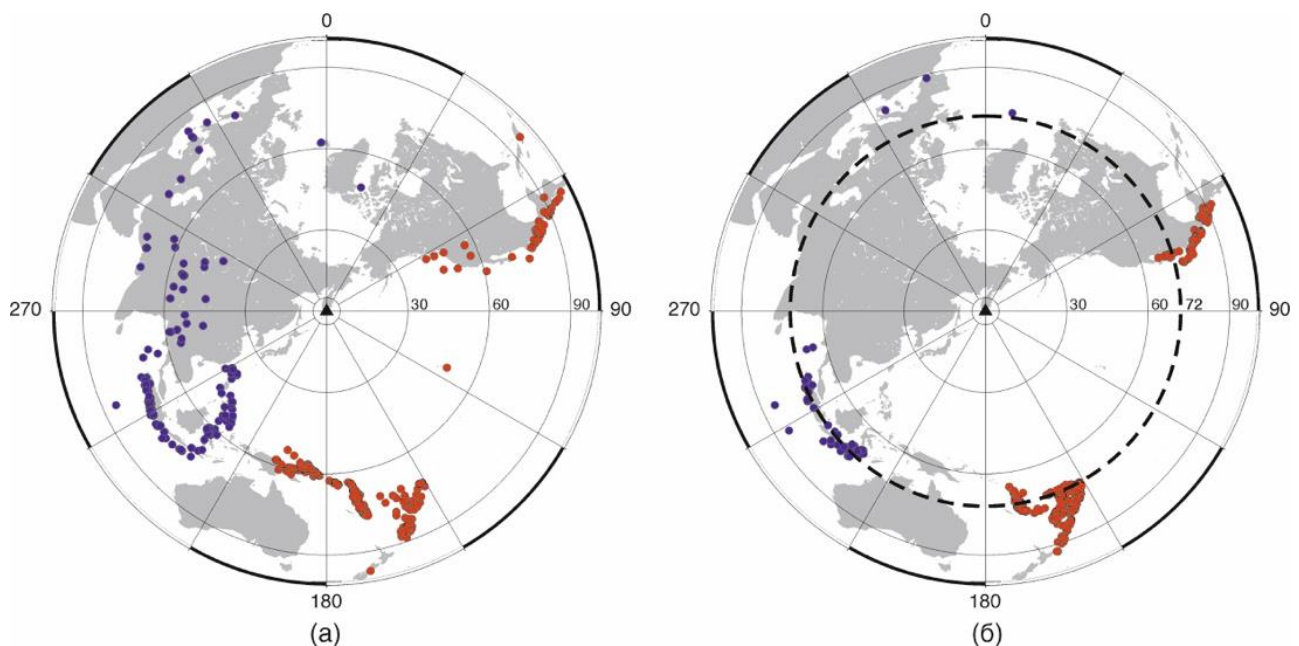


Рис. 1. Распределение эпицентров использованных событий для PRF (а) и SRF (б). Синими кружками отмечены отобранные события, сейсмические волны от которых не прошли через субдуцирующую плиту, красными – те, которые прошли через нее. Расположение станций показано черным треугольником. Пунктирным кругом на (б) показано эпицентральное расстояние, являющееся предельным для формирования обменной  $S$ - $P$ -волны от границы 410 на SRF

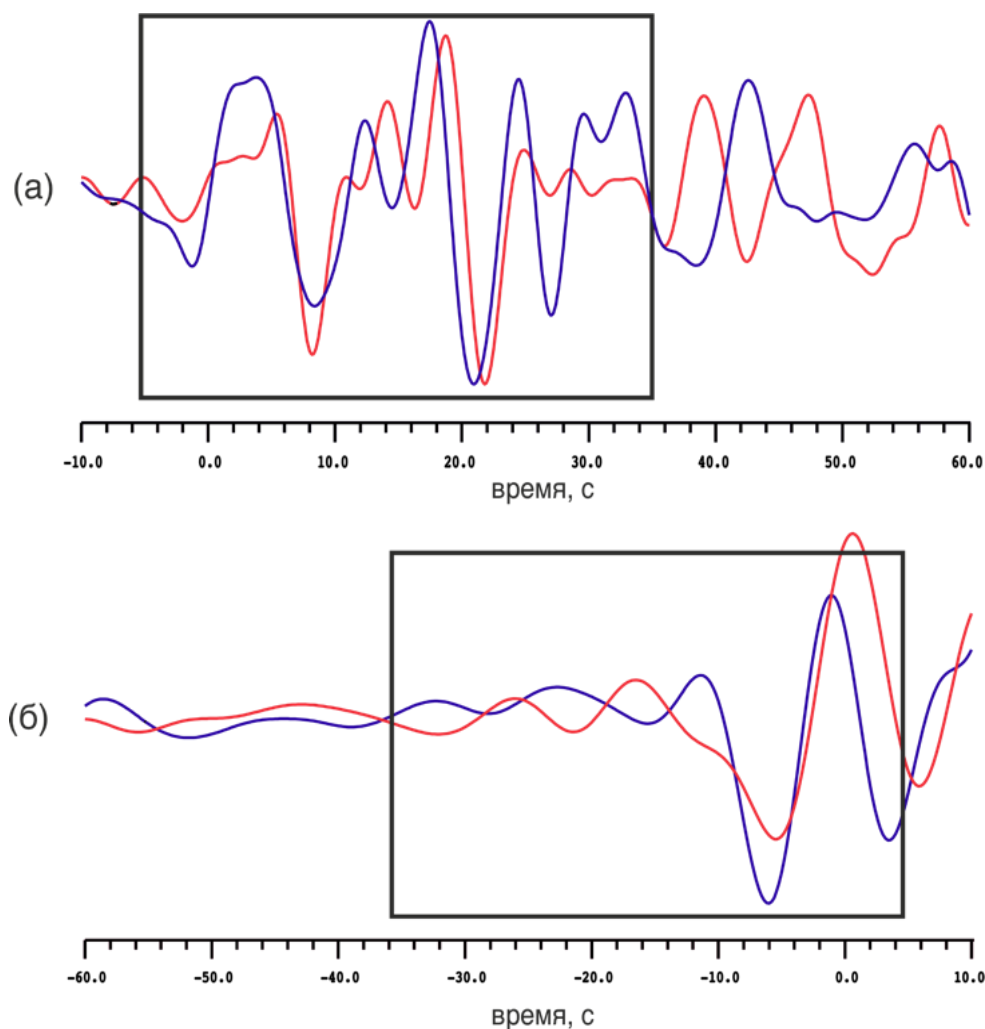


Рис. 2. Суммарные  $P$ - (а) и  $S$ -функции (б) приемника, полученные суммированием волн, прошедших через слэб (красным) и не прошедших через него (синим). Рамками выделены временные интервалы, в пределах которых осуществляется инверсия

Для восстановления глубинных скоростных моделей изучаемого района была использована совместная инверсия PRF и SRF на основе методики, описанной в [Алешин, 2021]. При этом для локализации района, к которому относятся определенные значения скоростей на данной глубине, были вычислены «точки обмена» (проекции на дневную поверхность мест формирования обменных волн в среде) на глубине 35 км или ожидаемой глубине коро-мантийного перехода. Суммирование индивидуальных PRF и SRF производилось относительно точек обмена. Положение вычисленных точек обмена, а также скоростные модели приведены на рис. 3. Наиболее яркими особенностями полученных моделей являются пониженные значения скоростей  $V_s$  для всех моделей, причем не только в земной коре, но и в верхней мантии. Граница Мохо определяется на глубине около 35 км. Кроме того, в модели непосредственно под Авачинским заливом выявляется отсутствие выраженной границы кора – мантия, что может быть связано со сложной флюидодинамикой изучаемого района.

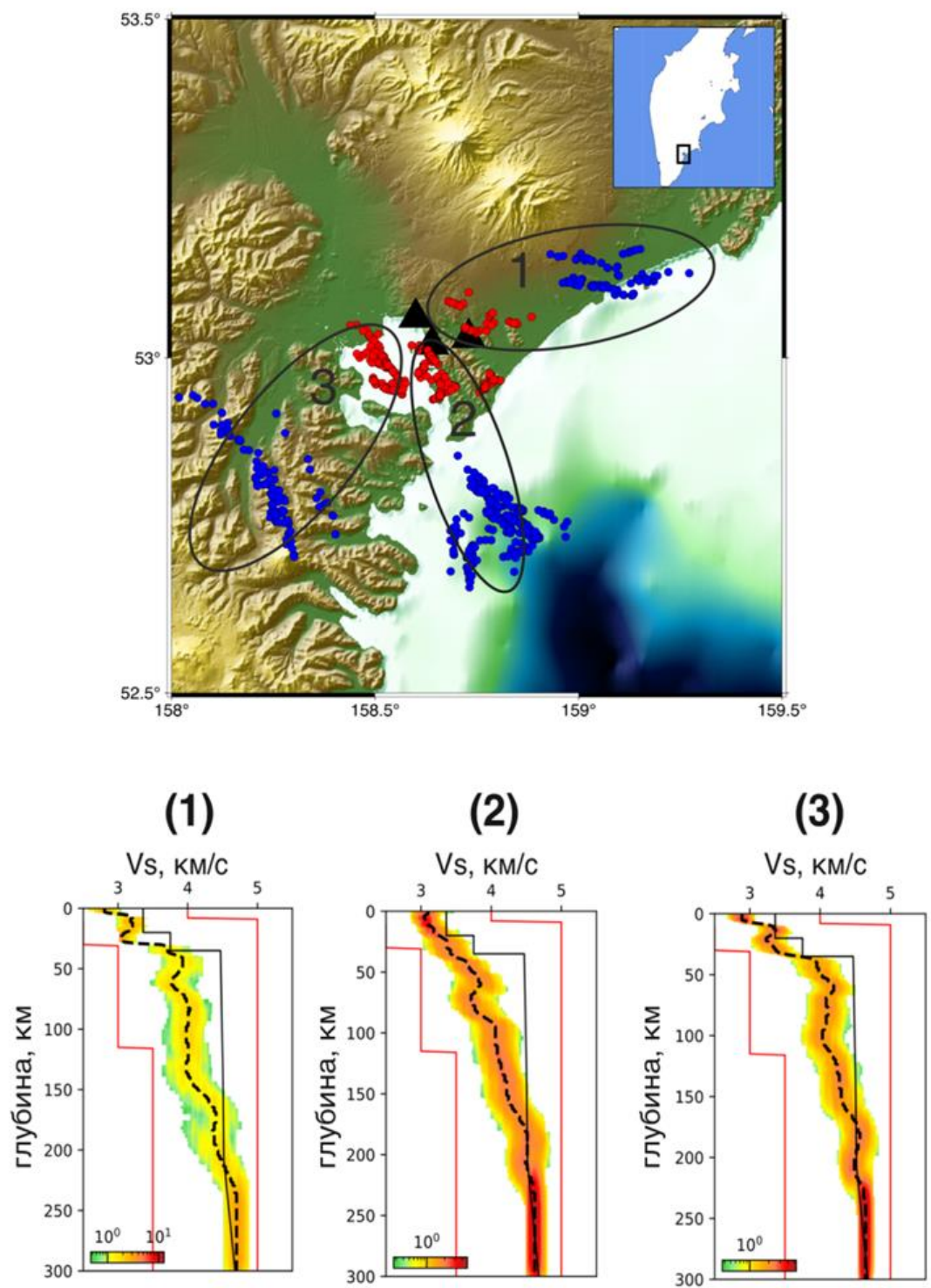


Рис. 3. Карта региона исследований с вычисленными точками обмена для глубины 35 км (красными для PRF, синими для SRF). Районы, к которым приурочены скоростные модели, показаны овалами и пронумерованы. Черными треугольниками показано положение использованных сейсмических станций. Полученные скоростные модели приведены внизу. Цветами показаны поля сгущений минимизированных начальных моделей. Пунктиром показаны итоговые решения. Черной тонкой линией показана референтная модель IASP91

*Работа выполнена в соответствии с государственным заданием № 122040400015-5 и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».*

### ***Литература***

- Алешин И.М.* Построение решения обратной задачи по ансамблю моделей на примере инверсии приемных функций // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 1. С. 63–66. DOI:[10.31857/S2686739721010047](https://doi.org/10.31857/S2686739721010047)
- Винник Л.П.* Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. С. 16–27. DOI:[10.31857/S0002-33372019116-27](https://doi.org/10.31857/S0002-33372019116-27)
- Farra V., Vinnik L.* Upper mantle stratification by *P*- and *S*-receiver functions // Geophysical Journal International. 2000. V. 141. P. 699–712. DOI:[10.1046/j.1365-246X.2000.00118.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2000.00118.x)

## **DEEP VELOCITY MODELING APPLICABILITY AND RESULTS USING RECEIVER FUNCTION METHOD WITHIN THE AVACHA BAY (KAMCHATKA)**

**Reznichenko R.A., Goev A.G.**

*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [reznichenkora@yandex.ru](mailto:reznichenkora@yandex.ru)*

УДК 550.34

## НОВЫЙ АЛГОРИТМ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ – ПОДХОДЫ И ВОПРОСЫ

Родкин М.В.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

*E-mail: [rodkin@mitp.ru](mailto:rodkin@mitp.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** Обсуждается возможность использования нового алгоритма прогноза землетрясений, где за основу берется набор предвестниковых эффектов, ранее надежно выявленных в обобщенной окрестности сильного землетрясения. Также принимается во внимание различие физических механизмов реализации разноглубинных землетрясений. Обсуждаются подходы к реализации такого алгоритма, возникающие трудности и предварительные результаты.

**Ключевые слова:** прогноз землетрясений, физика сейсмического разрушения

Как известно, разными авторами было предложено довольно большое число разных методов прогноза землетрясений. Многие из этих методов обеспечивают прогноз существенно лучше случайного угадывания, но точности этих прогнозов недостаточно, чтобы потери при ошибочном прогнозе заведомо превышали объемы предупрежденного ущерба; методы прогноза дают значительное число как ложных тревог, так и ошибок пропуска цели. Достаточно распространена точка зрения и о принципиальной невозможности успешного прогноза. Отсюда очевидна актуальность задачи как доказательства возможности прогноза, так и повышения точности вариантов прогнозов, в частности разработки новых подходов к прогнозу землетрясений.

Достаточно распространено мнение, что одной из причин недостаточной успешности прогноза является отсутствие достаточно развитой физической модели сейсмического процесса. При этом, из общих физических соображений, предполагалось, что физический механизм сейсмического разрушения не может быть одинаковым для разноглубинных землетрясений. Соответственно такое различие может проявляться и в характере прогнозных эффектов. Но при этом характер процесса разрушения для разноглубинных землетрясений остается не ясным, соответственно и физические модели ожидаемых прогнозных эффектов, возможно, частично различных для разноглубинных землетрясений, фактически отсутствуют.

Обычно на основе эмпирических данных об ранее имевших место землетрясениях формируется некий возможный прогнозный признак, и под него предлагаются и физическое его объяснение, и алгоритм прогноза. В обсуждаемом ниже подходе реализуется определенное продвижение по обеим этим проблемам: как по физике сейсмического

процесса разноглубинных землетрясений, так и по уточнению характера предвестников. Но при этом ставятся и новые вопросы.

Ранее автором был проведен анализ обобщенной окрестности сильного землетрясения [Родкин, 2008; 2020; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016], в результате чего был существенно уточнен как характер нескольких ранее известных прогнозных признаков, так и выявлен ряд новых. В целом, на основе проведенного анализа обобщенной окрестности сильного события был построен комплекс прогнозных признаков, отвечающих совокупности сильных землетрясений  $M7.0+$ . При этом поведение осредненных прогнозных признаков, полученных при агрегировании данных по окрестностям сотен происшедших сильных землетрясений, было установлено вполне определено. Также были представлены убедительные сейсмологические свидетельства изменения характера сейсмического разрушения при разноглубинных землетрясениях [Rodkin, 2022]. Но если физика сейсмического процесса при разноглубинных землетрясениях различна, то следует ожидать, что и прогнозные признаки разноглубинных землетрясений также могут различаться. И такие различия были выявлены на примере сейсмоионосферных эффектов [Родкин, Липеровская, 2023]. Учет различия прогнозных признаков от разноглубинных землетрясений позволяет, в принципе, ставить вопрос также и о прогнозе глубины землетрясения, чего ранее не делалось; идеальным прогнозом полагалось указание ожидаемого района, интервала времени и магнитуды землетрясения.

Подчеркнем, однако, что все перечисленные результаты были получены статистически, при осреднении результатов наблюдений за очаговыми областями весьма большего (до тысячи) числа разных сильных землетрясений. При использовании данных по меньшему (десятки, менее сотни) числу сильных событий осредненные прогнозные признаки теряли свою определенность и становились существенно переменными.

Легко видеть, что при построении совокупности четких прогнозных признаков по обобщенной окрестности сильного землетрясения использовался объем информации в десятки-сотни раз превосходящий объем данных, доступных при анализе окрестности отдельного сильного землетрясения, тем более в реальном времени, а не в ретроспективе. Отсюда возникает и вопрос о возможности выявить эти прогнозные признаки по данным об окрестности отдельно взятого сильного события. Но и нельзя исключить ведь и возможность существования нескольких базовых сценариев подготовки сильного сейсмического события [Ромашкова, Кособоков, 2001]. В этом случае совокупность четких прогнозных признаков, описанных в [Родкин, 2008; Rodkin, 2012; и др.], могла бы оказаться, в определенном смысле, фикцией, не проявляющейся в областях подготовки отдельных сильных землетрясений,



соответственно, она оказалась бы малополезной в плане прогноза. Ниже обсуждаются подходы к решению указанных трудностей.

В обсуждаемом подходе к прогнозу землетрясений в качестве предвестников предлагается рассматривать совокупность прогнозных эффектов, выявленных в результате анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения, с учетом определенного различия проявления прогнозных эффектов для мелких, промежуточных и глубоких землетрясений. Заметим, что часть из выделенных в обобщенной окрестности прогнозных признаков является (или может являться) вторичной. Так, например, тенденция роста к моменту обобщенного сильного землетрясения продолжительности процесса испаривания отдельных землетрясений может иметь вторичный характер и обуславливаться ростом средней магнитуды землетрясений (что эквивалентно такому часто используемому прогнозному признаку, как уменьшение  $b$ -value). С физической точки зрения такие эффекты не независимы, но при параметризации данного конкретного землетрясения (или группы землетрясений) соответствующая информация снимается с датчиков независимо; соответственно, такие прогнозных признаки могут рассматриваться в алгоритме прогноза как независимые, что увеличивает статистику и, тем самым, потенциальную достоверность проводимого анализа.

По данным каталогов землетрясений, где независимо приводятся данные по гипоцентру события и параметры сейсмического момента землетрясения, таким образом может рассматриваться до 8–10 разных предвестниковых аномалий. В других каталогах, где приводятся только данные по сейсмическому моменту или (чаще) только по гипоцентрии и магнитуде землетрясения, таких возможных прогнозных параметров будет меньше. Заметим, что при этом для каждого параметра в обобщенной окрестности достаточно уверенно устанавливается время начала развития аномалии, знак и характер ее роста по мере приближения момента основного землетрясения. В обобщенной окрестности время начала развития разных аномалий (с удовлетворительной точностью) не различается.

Обсуждаются пути реализации предлагаемого алгоритма прогноза, основанного на всем возможном комплексе осредненных признаков. Такой подход, предположительно, должен быть успешнее алгоритмов прогноза, основанных на использовании отдельных признаков. Проверка практической возможности применения такого алгоритма строится на анализе сейсмического режима в окрестности отдельного землетрясения и сравнении этих характеристик с типичной моделью аномалии, выявленной при анализе обобщенной окрестности сильного землетрясения.

Уже отмечалось, при этом возникает вопрос, в какой степени средние типичные прогнозных эффекты реализуются в каждом отдельном случае. Естественно проверить,

насколько типично проявляются средние прогнозные эффекты в ретроспективе по данным о ранее происшедших сильных землетрясениях. Учитывая практический аспект проблемы, для начала можно ограничиться случаем более сильных событий, чем были использованы при построении обобщенной окрестности. Заметим, что при этом совокупности данных, по которым обобщенная окрестность строилась и по которым проверяется типичность средних параметров, различаются.

Для первого такого сравнения были использованы сильные  $M7.5+$  землетрясения по данным наиболее длительного мирового каталога ISC-GEM. В использованной версии каталога таких оказалось более 400 событий. На первом этапе для сравнения использовались аномалии нарастающего форшокового каскада числа событий и изменения средней магнитуды и средней глубины событий.

Проверялось, насколько часто единичные случаи статистически достоверно (примерно на уровне 5%) отвечают ожидаемым модельным закономерностям. Таких событий оказалось даже менее 10% случаев; но при этом согласие с ожидаемым поведением часто наблюдалось сразу по нескольким параметрам. Выявить какую-либо тенденцию в характере событий (по их глубине, магнитуде или географическому расположению), где ожидаемое поведение проявлялось статистически более достоверно и где такого согласия не было, выявить не удалось. Наблюдается только соответствие с числом слабых событий, попадающих в форшоковую область данного главного землетрясения. При большом числе таких событий как бы «прогнозируемых» сильных землетрясений оказывается около половины; при малом числе слабых событий в форшоковой области случаев «успешного прогноза» выявлено не было. Эффективность такого ретроспективного прогноза по данным ISC-GEM каталога оказалась весьма низкой, но и каталог ISC-GEM не удобен для целей прогноза (хотя и обеспечивает максимальное число сильных событий).

В плане дальнейшей отработки нового алгоритма прогноза планируется увеличить число сравниваемых аномалий, усложнить алгоритм сравнения с идеальной моделью и уменьшить требование на уровень достоверности совпадения с идеальным прогнозным поведением для отдельного признака. Надо полагать, что доля как бы «прогнозируемых» землетрясений при этом увеличится, но увеличится и число ложных тревог. Также планируется перейти к использованию более детальных каталогов, что увеличит число слабых событий в форшоковых областях сильных землетрясений. Можно ожидать, что использование более полных каталогов улучшит эффективность прогноза, но при этом число случаев и статистическая достоверность оценки качества прогноза ухудшатся.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 23-27-00395 «Комплекс аномалий в обобщенной окрестности сильного землетрясения; физика процесса и использование в целях прогноза»).

### Литература

- Rodkin M.V. Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Вулканонология и сейсмология. 2008. № 6. С. 66–77.
- Rodkin M.V. Типовая фор- и афтершоковая аномалия – эмпирика, интерпретация // Вулканонология и сейсмология. 2020. № 1. С. 64–76.
- Rodkin M.V., Липеровская Е.В. О различии физических механизмов разноглубинных землетрясений и характера их ионосферного отклика // Физика земли. 2023. № 3. С. 48–62.
- Ромашкова Л.Л., Кособоков В.Г. Динамика сейсмической активности до и после сильнейших землетрясений мира, 1985–2000 // Вычислительная сейсмология. 2001. Вып. 32. С. 162–189.
- Rodkin M.V. Patterns of seismicity found in the generalized vicinity of a strong earthquake: Agreement with common scenarios of instability development, in Extreme Events and Natural Hazards // The Complexity Perspective. Geophysical Monograph Series / Eds A. S. Sharma et al. AGU, Washington, D.C. 2012. V. 196. P. 27–39. DOI:[10.1029/2011GM001060](https://doi.org/10.1029/2011GM001060)
- Rodkin M.V. The Variability of Earthquake Parameters with the Depth: Evidences of Difference of Mechanisms of Generation of the Shallow, Intermediate-Depth, and the Deep Earthquakes // Pure and Applied Geophysics. 2022. DOI:[10.1007/s00024-021-02927-4](https://doi.org/10.1007/s00024-021-02927-4)
- Rodkin M.V., Tikhonov I.N. The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake // Physics and Chemistry of the Earth. 2016. V. 95. P. 73–84. DOI:[10.1016/j.pce.2016.04.001](https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.04.001)

## NEW ALGORITHM FOR EARTHQUAKE FORECASTING – APPROACHES AND QUESTIONS

Rodkin M.V.

*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

*E-mail: [rodkin@mitp.ru](mailto:rodkin@mitp.ru)*

УДК 550.34

## ТЕНДЕНЦИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ВЫЗВАННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ПРИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОМ СИЛЬНОМ ТЕХНОГЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ?

Родкин М.В.<sup>1,2</sup>, Прохорова Т.В.<sup>1</sup>, Рукавишников Т.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия*

E-mail: [rodkin@mitp.ru](mailto:rodkin@mitp.ru)

(стендовый доклад)

**Аннотация.** На ряде примеров обсуждается тенденция уменьшения вызванной сейсмичности при длительном сильном антропогенном воздействии. Такой характер изменения может обуславливаться постепенной релаксацией исходных тектонических напряжений. Подтверждение этой тенденции могло бы иметь существенное практическое значение.

**Ключевые слова:** вызванная сейсмичность, сейсмическая опасность, тенденции изменения

Проблема вызванной сейсмичности не нова. Примеры возникновения сейсмичности в ранее слабосейсмичных или асейсмичных районах после заполнения водохранилищ, при интенсивной добыче нефти и газа, закачках воды и газа довольно многочисленны [Гунта, Растоги, 1979; Davis, Frohlich, 1993; Адушкин и др., 2000; Krupnick, Echarte, 2017; и многие другие]. При этом вызванная сейсмичность возникает далеко не во всех случаях сильного антропогенного воздействия [Гунта, Растоги, 1979], а в ряде случаев эффект вызванной сейсмичности может быть кажущимся и порождаться улучшением регистрации слабых землетрясений [Годзиковская, 2011]. Однако в значительном числе случаев возникновение существенной вызванной сейсмичности вполне достоверно. Таковы, например, районы добычи сланцевых УВ в Северной Америке [Krupnick, Echarte, 2017; Van der Baan, Calixto, 2017], область гигантского газового месторождения Гронинген в Голландии [Van Thienen-Visser, Breunese, 2015], область водохранилищ Койна и Варна в Индии [Гунта, Растоги, 1979; Смирнов и др., 2013], район Ингури ГЭС в Грузии [Chelidze et al., 2023] и другие. Число ощутимых землетрясений может возрастать при этом в сотни раз. При этом иногда даже и слабые вызванные землетрясения вызывают существенный ущерб, что связано с исходным отсутствием антисейсмических мероприятий, иногда дополняемым развитием слабых грунтов, на которых сейсмические воздействия проявляются особенно сильно.

С целью уменьшения опасности вызванной сейсмичности обычно вводятся ограничения на интенсивность техногенных воздействий. В случае добычи УВ естественно связать опасность вызванной сейсмичности с ростом числа и максимальной магнитуды землетрясений, возникающих вблизи данной скважины. Этот подход использован в известном методе «семафора» [Llenos, Michael, 2013; Krupnick, Echarte, 2017; Van der Baan, Calixto, 2017]. По типовому варианту этой методики, если не далее 5 км от скважины происходит

землетрясение с магнитудой  $M \geq 2.0$ , то «загорается желтый свет» и вводится план более тщательного мониторинга и уменьшения техногенной нагрузки. Если далее в этой же области происходит землетрясение с магнитудой  $M \geq 4.0$ , то «загорается красный свет» – работы прекращаются и могут возобновиться только по специальному разрешению.

Заметим, однако, что методика «семафора» не обеспечивает достаточной сейсмической безопасности. Некоторые, предположительно вызванные землетрясения происходят дальше от скважин (или от водохранилища) и с большей задержкой по времени, чем это предполагается в рамках методики «семафора»; при этом среди таких землетрясений бывают и довольно сильные [Родкин и др., 2019; Vorobieva et al., 2020].

С другой стороны, по данным длительного мониторинга сейсмичности в районе Ингури ГЭС в [Chelidze et al., 2023] делается вывод, что после периода роста вызванная сейсмичность уменьшилась и приблизилась к исходному уровню. Ниже обсуждаются другие примеры статистически достоверного уменьшения вызванной сейсмичности при продолжительном сильном кумулятивном техногенном воздействии.

Рассмотрим сначала случай гигантского газового месторождения Гронинген. Режим сейсмичности оценивался по данным о достоверно регистрируемых землетрясениях магнитудой  $M > 1.3$ . Сильный рост вызванной сейсмичности начался не сразу, а примерно через 30 лет после начала интенсивной добычи газа. В 2010-2015 годах число землетрясений достигло максимума. При этом даже несильные события, ввиду распространения в регионе слабых обводненных грунтов, иногда приводили к заметному ущербу. Поэтому было принято решение сократить объемы добычи газа. В 2018 году произошло еще одно вызвавшее существенные повреждения землетрясение, и было решено еще сильнее ограничить добычу газа и полностью закрыть месторождение не позднее 2030 года. В настоящее время этот план продолжает реализовываться. Уменьшение объемов добычи сопровождалось желаемым сильным уменьшением числа землетрясений.

При анализе сейсмичности области месторождения Гронинген обращает на себя внимание несколько моментов. Для землетрясений магнитудой  $M > 2.5$  угол наклона графика повторяемости заметно возрастает. При этом весь интервал времени развития сильной вызванной сейсмичности сопровождался тенденцией увеличения среднего наклона графика повторяемости  $b$ -value. На рубеже 2015 года уменьшение сейсмической опасности благодаря росту наклона графика повторяемости дополнилось резким уменьшением числа событий. Снижение со временем оценок сейсмической опасности в районе месторождения Гронинген отмечается в [Van Elk et al., 2017]. Но природа этого уменьшения не ясна; оно может быть связано с сокращением объемов добычи.

В качестве другого примера, также хорошо обеспеченного статистическими данными, рассмотрим район интенсивной добычи сланцевых углеводородов в Оклахоме, США. Данные по сейсмическому режиму были взяты с сайта US Geological Survey

(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>); по положению скважин и по режиму закачек – с сайта Oklahoma Corporation Commission (<https://www.oklahoma.gov/occ/divisions/oil-gas.html>). Сейсмический режим этой области анализировался в [Llenos, Michael, 2013; Van der Baan, Calixto, 2017; Vorobieva et al., 2020; и др.], где была показана связь сейсмичности с режимом закачек.

В Оклахоме типичный для тектонических землетрясений наклон графика повторяемости наблюдается в диапазонах магнитуд примерно до  $M = 3.3$  и, возможно, для редких событий с магнитудой  $M > 4.5$ . В среднем диапазоне угол наклона графика повторяемости становится аномально большим, указывая на уменьшение вероятности реализации более сильных событий [Vorobieva et al., 2020]. При этом 4 наиболее сильных землетрясения отвечают пространственно-временной области малых объемов закачек. Для района Оклахомы также наблюдаем выраженную тенденцию увеличения наклона графика повторяемости, соответственно, некоторого уменьшения сейсмической опасности с ростом величин техногенной нагрузки. Заметим также, что наблюдаемое в последние годы в районе интенсивной добычи сланцевых углеводородов в Оклахоме уменьшение числа землетрясений не коррелирует с изменениями объемов нефтедобычи. Отсюда можно предположить, что это уменьшение связано не с уменьшением техногенной нагрузки, а с релаксацией исходных тектонических напряжений. Интересно, что связь между локализацией многочисленных вызванных землетрясений и известными разломами оказалась весьма слабой.

В целом, для вполне статистически представительных данных по районам вызванной сейсмичности (гигантское газовое месторождение Гронинген в Нидерландах и область добычи сланцевой нефти, Оклахома, США) наблюдается тенденция уменьшения опасности вызванной сейсмичности при продолжающихся высоких техногенных нагрузках. Этой тенденции отвечает как рост со временем величин наклона графика повторяемости, так и уменьшение числа землетрясений; при этом для области Оклахомы уменьшение числа событий не коррелирует с изменениями объемов добычи. Ранее подобная тенденция была отмечена для области Ингури ГЭС, Грузия [Chelidze et al., 2023]. Тенденция уменьшения вызванной сейсмичности при продолжительных и сильных техногенных воздействиях может объясняться снятием порождающих сильные землетрясения тектонических напряжений.

Существование тенденции уменьшения сейсмической опасности при продолжительном сильном техногенном воздействии – в случае ее подтверждения дальнейшими исследованиями – может иметь важное практическое применение.

*Авторы выражают благодарность проф. А. Кийко за предоставление каталога данных по сейсмичности области месторождения Гронинген. Работа выполнена в рамках государственных заданий ИТПЗ РАН и ИПНГ РАН (Номер гос. учёта темы НИОКТР в РОСРИД 122022800270-0).*

### **Литература**

Адушкин В.В., Родионов В.Н., Турунтаев С.Б., Юдин А.Е. Сейсмичность месторождений углеводородов // Нефтегазовое обозрение. 2000. № 1. С. 4–15.

- Годзиковская А.А. Местные взрывы и землетрясения. Сейсмический режим в районах крупнейших ГЭС России. М.: Мордвинцев, 2011. 110 с.
- Гупта Х., Растоги Б. Плотины и землетрясения. М: МИР, 1979. 257 с.
- Родкин М.В., Нго Тхи Лы, Рукавишников Т. А., Фунг Тхи Тху Ханг. Вызванная сейсмичность при добыче нефти и газа – обзор // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 4-7 июня 2019 г.): материалы V Международной конференции / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2019. С. 98–103.
- Смирнов В.Б., Chadha R.K., Пономарев А.В., Srinagesh D. Прогностические аномалии наведенной сейсмичности в области водохранилищ Койна – Варна, Западная Индия // Физика Земли. 2013. № 2. С. 94–109.
- Chelidze T., Matcharashvili T., Mepharidze E., Dovgal N. Complexity in Geophysical Time Series of Strain/Fracture at Laboratory and Large Dam Scales: Review // Entropy. 2023. V. 25. No 3. Article 467. DOI:[10.3390/e25030467](https://doi.org/10.3390/e25030467)
- Davis S., Frohlich C. Did (Or Will) Fluid Injection Cause Earthquakes? - Criteria for a Rational Assessment // Seismological Research Letters. 1993. V. 64. No 3–4. P. 207–224. DOI:[10.1785/GSSRL.64.3-4.207](https://doi.org/10.1785/GSSRL.64.3-4.207)
- Krupnick A., Echarte I. Induced Seismicity Impacts of Unconventional Oil and Gas Development // RFF. Report. 2017. Goebel, T.H.W. 30 p.
- Llenos A.L., Michael A.J. Modeling Earthquake Rate Changes in Oklahoma and Arkansas: Possible Signatures of Induced Seismicity // Bulletin of the Seismological Society of America. 2013. V. 103. No 5. P. 2850–2861. DOI:[10.1785/0120130017](https://doi.org/10.1785/0120130017)
- Van der Baan K., Calixto F.J. Human - induced seismicity and large - scale hydrocarbon production in the USA and Canada // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2017. V. 18. No 7. P. 2467–2485. DOI:[10.1002/2017GC006915](https://doi.org/10.1002/2017GC006915)
- Van Elk J., Doornhof D., Bommer J., Bourne S., Oates S., Pinho R., Crowley H. Hazard and risk assessments for induced seismicity in Groningen // Netherlands Journal of Geosciences. 2017. V. 96. No 5. P. 259–269. DOI:[10.1017/njg.2017.37](https://doi.org/10.1017/njg.2017.37)
- Van Thienen-Visser K., Breunese J.N. Induced seismicity of the Groningen gas field: History and recent developments // The Leading Edge. 2015. V. 34. No 6. P. 664–671. DOI:[10.1190/tle34060664.1](https://doi.org/10.1190/tle34060664.1)
- Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C. Condition of Occurrence of Large Man-Made Earthquakes in the Zone of Oil Production, Oklahoma // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2020. V. 56. No 6. P. 911–919. DOI:[10.1134/S10693513200601309](https://doi.org/10.1134/S10693513200601309)

## DOES EXIST A DECREASING TREND IN THE INDUCED SEISMICITY UNDER PROLONGED STRONG TECHNOGENIC IMPACT?

Rodkin M.V.<sup>1,2</sup>, Prokhorova T.V.<sup>1</sup>, Rukavishnikova T.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia

<sup>2</sup> Oil and Gas Research Institute, RAS, Moscow, Russia

E-mail: [rodkin@mitp.ru](mailto:rodkin@mitp.ru)

УДК 550.34

## СФЕРИЧЕСКАЯ БЛОКОВАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ И СЕЙСМИЧНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Розенберг В.Л.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН,  
г. Екатеринбург, Россия*

<sup>2</sup> *Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия*

E-mail: [rozen@imm.uran.ru](mailto:rozen@imm.uran.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** Приводится краткое описание текущей версии сферической блоковой модели динамики и сейсмичности литосферы. Основное внимание уделяется возможностям учета влияния случайных факторов на процесс моделирования и внедрению конструктивной процедуры автоматической калибровки модели (подбора ее параметров) для получения наилучшей аппроксимации ключевых свойств региональной и/или глобальной сейсмичности. Обсуждаются результаты вычислительных экспериментов.

**Ключевые слова:** сферическая блоковая модель динамики и сейсмичности литосферы, характеристики сейсмичности, калибровка модели, распараллеливание вычислений

Статистический анализ сейсмичности как пространственно-временной последовательности землетрясений на основе каталогов зарегистрированных событий крайне затруднен ввиду короткой истории надежных инструментальных наблюдений. Явления, обнаруженные в реальных каталогах землетрясений, могут быть единичными и не повторяться в будущем. Искусственные же каталоги, полученные путем численного моделирования, могут покрывать сколь угодно длительные интервалы времени, что позволяет анализировать значимость исследуемых свойств сейсмического потока, в частности, выявлять/подтверждать закономерности, предшествующие сильным толчкам, что может быть востребовано в экспертных системах мониторинга регионального и глобального сейсмического риска [Gabriellov, Newman, 1994; Nonlinear..., 2003; Ismail-Zadeh, Soloviev, 2022]. Основным результатом моделирования сейсмичности литосферы является искусственный каталог землетрясений, в котором каждое событие характеризуется моментом времени, координатами эпицентра, глубиной и магнитудой. Моделирование динамики земной коры предполагает получение поля скоростей движения точек на разных глубинах, действующих сил, обусловленных ими смещений, а также характера взаимодействия структурных элементов. Среди различных подходов к моделированию литосферных процессов (см., например, работу [Gabriellov, Newman, 1994] и библиографию к ней) можно выделить два основных направления. Первое опирается на детальное исследование одного специфического тектонического разлома или, нередко, одного конкретного сильного землетрясения с целью воспроизведения определенных пре- и/или



постсейсмических явлений, характерных для данного разлома или события. Модели второго направления трактуют сеймотектонический процесс гораздо более абстрактно; основной задачей моделирования является получение универсальных свойств сейсмичности, обнаруженных эмпирическим путем (прежде всего, степенного закона распределения «размера» событий (закона повторяемости Гутенберга – Рихтера), кластеризации, миграции событий, сейсмического цикла и т. д.). Представляется, однако, что адекватная модель должна не только отражать некоторые общие свойства нелинейных динамических систем, но и учитывать геометрию взаимодействующих тектонических разломов. Блочные модели динамики и сейсмичности литосферы [Nonlinear..., 2003; *Ismail-Zadeh, Soloviev, 2022*] разрабатывались с учетом обоих требований. Тектонические плиты представляются в виде системы абсолютно жестких блоков, находящейся в состоянии квазистатического равновесия; при этом модельное событие представляет собой резкий сброс напряжений, возникающих на разломах, разделяющих блоки, под действием внешних сил. Два главных механизма, включенных в сеймотектонический процесс, – тектоническое нагружение с характеристической скоростью в несколько см/год и перераспределение упругого напряжения с характеристической скоростью в несколько км/сек – рассматриваются в модели в стандартной временной шкале как равномерное движение и мгновенный сброс напряжения соответственно. Волновые процессы остаются вне рамок существующих блоковых моделей. Плоская модель, в которой структура ограничена двумя горизонтальными плоскостями, является наиболее изученной; на ее основе построены аппроксимации реальных сейсмических регионов [Nonlinear..., 2003; *Ismail-Zadeh, Soloviev, 2022*]. Однако при попытке моделирования динамики глобальных тектонических плит обнаружены существенные неточности, для преодоления которых введена сферическая геометрия. Компьютерная реализация сферического варианта потребовала значительных затрат памяти и времени работы процессора, что привело к необходимости применения параллельных вычислительных технологий.

Настоящая работа, являясь продолжением исследований [*Rozenberg et al., 2005; Rozenberg, 2020*], состоит в изучении различных возможностей учета случайных факторов в процессе моделирования динамики тектонических плит и результатов внедрения конструктивной процедуры автоматической калибровки модели для получения наилучшей аппроксимации ключевых свойств региональной и/или глобальной сейсмичности. Приведем краткое описание текущей версии сферической блоковой модели динамики и сейсмичности литосферы. Подход к моделированию опирается на представление тектонических плит в виде системы абсолютно жестких блоков на сфере. Блоковая структура является ограниченной и односвязной частью шарового слоя переменной глубины, заключенного

между двумя концентрическими сферами, одна из которых (внешняя) интерпретируется как поверхность Земли, другая (внутренняя) – как нижняя граница упругой литосферы. Разделение структуры на блоки определяется пересекающими этот слой бесконечно тонкими разломами, каждый из которых представляет собой коническую поверхность, наклоненную под определенным углом к внешней сфере. Во все моменты времени система находится в состоянии квазистатического равновесия; при этом модельным событием является резкий сброс напряжений, возникающих на разломах, разделяющих блоки, под действием внешних сил со стороны граничных блоков (при их наличии) и подстилающей среды. Важной особенностью сферической модели является возможность задания замкнутой блоковой структуры, покрывающей всю поверхность Земли. В этом случае единственным источником модельных трансформаций является движение подстилающей среды, которое определяется как вращение на сфере согласно модели HS3-NUVEL1. Основными результатами моделирования служат искусственный каталог землетрясений, в котором событие характеризуется моментом времени, координатами эпицентра, глубиной и магнитудой, а также характеристики взаимодействия элементов блоковой структуры (напряжения, силы, смещения на разломах и границе литосфера/мантия). В качестве базовых характеристик, определяющих качество моделирования, рассматриваются пространственное распределение сильных событий, закон повторяемости Гутенберга – Рихтера, возможности кластеризации и миграции событий, а также типы межблочных границ. Калибровка модели осуществляется с помощью минимизации на множестве допустимых значений параметров модели специального функционала, представляющего собой, с учетом перечисленных критериев, взвешенную сумму отклонений модельных и реальных данных [Rozenberg, 2020]. Одной из последних по времени модификаций было введение стохастической компоненты в процедуры вычисления сил, действующих на блок и фактически определяющих модельные землетрясения, через «зашумление» дифференциальных уравнений динамики сил и смещений и через использование случайных величин при задании порогов прочности среды тектонических разломов. Такие дополнения были призваны отразить в рамках блоковой модели неподдающуюся точному аналитическому описанию и фактически непредсказуемую изменчивость прочности среды разломов. Вычислительные эксперименты подтвердили, что внедрение в модель элементов случайности улучшило свойства искусственной сейсмичности по сравнению с предыдущими версиями модели. Современная версия модели реализована в виде пакета программ, ориентированного на многопроцессорную технику в вычислительных процедурах, что обеспечило возможность использования в расчетах реальных геофизических и сейсмических данных [Мельникова, Розенберг, 2015].

В качестве примера приведем результаты моделирования пространственного распределения сильных событий (рис. 1). С учетом отсутствия модельных событий внутри блоков (специфика всех блоковых моделей), в искусственном каталоге очевидным образом можно идентифицировать ряд черт, присущих реальной сейсмичности, а именно: (а) два основных сейсмических пояса, Тихоокеанский и Средиземноморско-Трансазиатский, где происходит большая часть сильных событий; (б) протяженную, но менее выраженную, сейсмичность срединно-океанических хребтов; (в) увеличение сейсмической активности вблизи точек, где сходятся три и более плит. Как следствие, установлено соответствие многих сейсмически активных и «спокойных» регионов реальным.

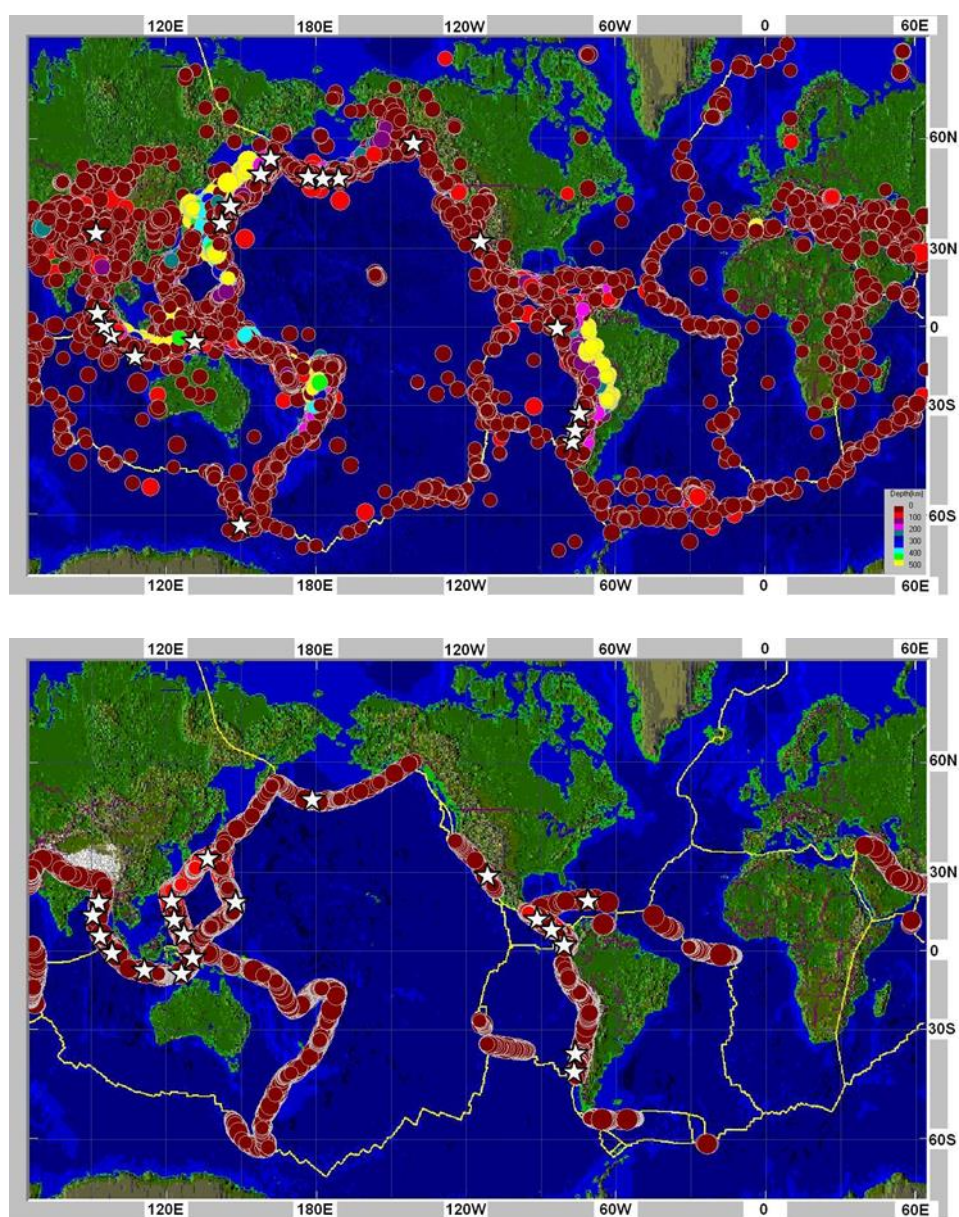


Рис. 1. Сравнение зарегистрированной (верхний рисунок, каталог NEIC, 01.01.1900–31.12.2021) и модельной (нижний рисунок, модельный каталог, 100 единиц безразмерного времени) сейсмичности: показаны эпицентры сильных событий с  $M \geq 6.0$ ; 20 сильнейших событий отмечены звездочками

Степень согласования результатов моделирования с реальными данными по критериям, упомянутым выше, позволяет надеяться на возможность эффективного практического применения сферической модели, например, в экспертных системах мониторинга регионального и глобального сейсмического риска для выявления потенциально опасных регионов с целью их более тщательного анализа. Это направление развития модели представляется приоритетным. В связи с ним планируется модификация модуля наглядной визуализации пошаговых результатов моделирования для изучения влияния параметров модели на распространение напряжения в структуре и отслеживания в динамике миграции модельных событий вдоль тектонических разломов.

*Работа выполнена в рамках исследований, проводимых в Уральском математическом центре при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер соглашения 075-02-2023-913).*

### **Литература**

- Мельникова Л.А., Розенберг В.Л.* Стохастическая модификация сферической блоковой модели динамики и сейсмичности литосферы // Вычислительные методы и программирование. 2015. Т. 16. С. 112–122. DOI:[10.26089/NumMet.v16r112](https://doi.org/10.26089/NumMet.v16r112)
- Gabrielov A.M., Newman W.I.* Seismicity Modeling and Earthquake Prediction: a Review // Geophysical Monograph 83, IUGG. 1994. V. 18. P. 7–13. DOI:[10.1029/GM083P0007](https://doi.org/10.1029/GM083P0007)
- Ismail-Zadeh A.T., Soloviev A.A.* Numerical Modelling of Lithospheric Block-and-Fault Dynamics: What Did We Learn about Large Earthquake Occurrences and Their Frequency? // Surveys in Geophysics. 2022. V. 43. P. 503–528. DOI:[10.1007/s10712-021-09686-w](https://doi.org/10.1007/s10712-021-09686-w)
- Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction / V.I. Keilis-Borok, A.A. Soloviev (Eds.). Springer, 2003. 337 p. DOI:[10.1007/978-3-662-05298-3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-05298-3)
- Rozenberg V.L.* Block Model of Lithosphere Dynamics: New Calibration Method and Numerical Experiments // Parallel Computational Technologies, Communications in Computer and Information Science (CCIS) / Sokolinsky L., Zymbler M. (Eds.). Springer, 2020. V. 1263. P. 181–197. DOI:[10.1007/978-3-030-55326-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55326-5_13)
- Rozenberg V.L., Sobolev P.O., Soloviev A.A., Melnikova L.A.* The Spherical Block Model: Dynamics of the Global System of Tectonic Plates and Seismicity // Pure and applied geophysics. 2005. V. 162(1). P. 145–164. DOI:[10.1007/s00024-004-2584-4](https://doi.org/10.1007/s00024-004-2584-4)

## **SPHERICAL BLOCK MODEL OF LITHOSPHERE DYNAMICS AND SEISMICITY: STATE-OF-THE-ART AND PERSPECTIVES**

Rozenberg V.L.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics UB RAS, Yekaterinburg,  
Russia*

<sup>2</sup> *Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia*

*E-mail: [rozen@imm.uran.ru](mailto:rozen@imm.uran.ru)*

УДК 550.34

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ДЛЯ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ ПРИ ОЦЕНКАХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Ружич В.В.<sup>1</sup>, Левина Е.А.<sup>1</sup>, Бержинская Л.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры, СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский научно-исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия

E-mail: [ruzhigh@crust.irk.ru](mailto:ruzhigh@crust.irk.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** В работе представлены результаты совместного использования результатов средне- и долгосрочного прогноза землетрясений с  $K \geq 13$  ( $M \geq 5.0$ ), полученные с применением созданной геоинформационной системы «Prediction» и разработанной двухстадийной модели подготовки землетрясений в сегментах разломов Байкальской рифтовой зоны. Рассмотрен пример использования данных прогноза для оценки сейсмической опасности в сегменте Главного Саянского разлома, где возможно землетрясение с  $M \approx 7.1-7.8$ . Для него представлены вероятностные оценки возникновения с  $P = 0.39$  и  $P = 0.89$  за периоды ожидания соответственно 10 и 50 лет в районе г. Ангарска. Обсуждаются возможности применения полученных сведений для оценок сейсмического риска и градостроительной уязвимости на территории Иркутской агломерации.

**Ключевые слова:** прогноз землетрясений, сейсмическая брешь, физическое моделирование, эксгумированные сейсмодислокации, двухстадийная модель, сейсмическая опасность, сейсмический риск

**Методы исследований.** В Институте земной коры СО РАН в течение четырех десятилетий при тесном сотрудничестве с отечественными и зарубежными специалистами проводятся мультидисциплинарные исследования в области разработки методов среднесрочного прогноза опасных землетрясений на территории Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Для оценок сейсмической опасности на рассматриваемой территории авторами осуществлялся сейсмопрогностический мониторинг с применением разработанной геоинформационной системы (ГИС) «Prediction» [Ружич, Левина, 2022]. Акцент был сделан на улучшение возможностей среднесрочного прогноза в интервале 1–11 лет, а также отчасти долгосрочного: за 10–50 лет. Предложенный подход основывается на совокупности используемых сейсмологических сведений от Байкальского филиала Единой геофизической службы РАН (г. Иркутск) и каталога исторических землетрясений для Прибайкалья за период 298 лет. Наряду с сейсмологическими данными используются сведения, полученные при изучении режима подготовки сейсמודинамических событий в ледяном покрове озера Байкал, а также при проведении тектонофизических натуральных экспериментов в участках разломов [Ружич и др., 2018]. Для выяснения геомеханических условий возникновения сейсмической диссипации осуществлялось геолого-структурное и петрофизическое изучение

глубинных фрагментов очагов палеоземлетрясений, эксгумированных на земную поверхность в результате длительного эрозионного среза поднимающихся геоблоков земной коры [Ружич и др., 2018].

**Основные результаты среднесрочного прогноза землетрясений в БРЗ.** В течение 2001–2022 гг. авторами регулярно отправлялись в органы МЧС Иркутской области сейсмо-прогностические сводки с указанием сведений по среднесрочному прогнозу на ближайшие месяцы-годы. На основании комплексного анализа сейсмологических, геологических и экспериментальных данных была разработана двухстадийная феноменологическая модель, характеризующая режим предшоковой подготовки очагов землетрясений с  $K \geq 13$  ( $M \geq 5.0$ ) в пределах БРЗ. Это позволило оценивать не только параметр М-место подготовки, но также приблизиться к выяснению количественных значений двух других важных параметров: Е-энергия и Т-время. Значимые результаты по среднесрочному прогнозу землетрясений были получены в период сейсмической активизации в 2019–2022 гг., за который зафиксировано 33 сейсмических события с  $K \geq 13$ . Согласно сделанному среднесрочному прогнозу по параметру М-место в намеченные районы попали 76% эпицентров таких землетрясений. Оценки двух других параметров, Е и Т, оказались менее надежными [Ружич, Левина, 2022].

**Об уточнении оценок сейсмической опасности.** Термин «сейсмическая опасность» по смыслу рассматривается как оценки угроз человеческой жизни, коммуникациям и окружающей среде, возникающих в моменты сильных землетрясений на конкретной территории. В порядке совершенствования, наряду с известным палеосейсмологическим подходом для выявления мест подготовки и оценок энергии землетрясений, в последние десятилетия все чаще используется возможность применить достаточно информативный сейсмогеологический подход, основанный на явлениях современной сегментации зон разломов. В нем на основании инструментальной регистрации землетрясений выделяются сейсмоактивные сегменты и сегменты относительно сейсмически пассивные, то есть сейсмические бреши. С позиций геомеханики сейсмические бреши рассматриваются «запертыми» высоконапряженными участками разломов в периоды, предшествующие моментам возникновения сильных землетрясений, и они считаются сейсмоопасными именно в предстоящие десятилетия. Есть возможность оценивать их энергетический потенциал по соотношению  $L/M$ , где  $L$  – линейная протяженность «запертых» сегментов в пределах сейсмической бреши [Leonard, 2010]. По отношению к палеосейсмологическому методу применение сегментарного подхода позволяет с большей определенностью выявлять район и энергетический потенциал «запертых» сегментов разломов в сейсмических брешах.

В докладе в кратком изложении обсуждается способ использования полученных оценок сейсмической опасности от возможных землетрясений в зоне Главного Саянского разлома (ГСР) в рамках сценарного землетрясения для г. Ангарска, расположенного на удалении от зоны ГСР на расстояния 100–120 км [Фролова и др., 2022]. Предпринятый коллективом авторов междисциплинарный подход направлен на выявление энергетических оценок будущих опасных землетрясений с учетом сведений, полученных с использованием сейсмологических, исторических и палеосейсмологических данных. В недавней работе с использованием новых статистических методов представлены результаты изучения структуры сейсмического поля в БРЗ на разных иерархических уровнях [Писаренко и др., 2022]. В работе также показано, что сейсмогенная структура БРЗ состоит из совокупности разномасштабных пятен сейсмической активности и сейсмических брешей, которые в совокупности характеризуют сеймотектонические процессы сегментации всей БРЗ при ее современной эволюции, в ранге мегаразлома. В работе показано, что для оценок сейсмической опасности используемый параметр  $M_{\max}$  является не вполне адекватным, поскольку его верхняя доверительная граница связана с длительностью периодов повторяемости во многие сотни – первые тысячи лет. Следовательно, для коротких периодов ожидания 10–50 лет более вероятно ожидать короткопериодные события с  $M_{\max} \approx 7.1$ . За более длительный период, порядка 300 лет или более, вероятность возникновения сильного события с магнитудой порядка  $M_{\max} = 8.0$  значительно возрастает. Полученные в упомянутой работе выводы использовались для уточнения оценок сейсмической опасности для г. Ангарска. Этот промышленно развитый город располагается на относительно небольшом удалении от сейсмической брешы в зоне ГСР (порядка 100 км). До настоящего времени исходная сейсмическая опасность для г. Ангарска оценивается на уровне  $M_{\max} = 8.0–8.2$  ввиду учета обнаруженных протяженных палеосейсмодислокаций с примерными возрастными во многие сотни – первые тысячи лет [Чипизубов, Смекалин, 1999]. Ниже, в целях уточнения уровня сейсмической угрозы, нами были использованы более современные способы. Для этого взяты полученные сведения среднесрочного прогноза, указывающие наличие в зоне ГСР сейсмической брешы, то есть сегмента с низкой сейсмической активностью в последние десятилетия. Сейсмический потенциал подобного сегмента с протяженностью порядка 60 км можно вычислить на основании используемых в мировом сообществе представлений о существующих разделениях сеймотектонической сегментации разломов на активные и пассивные участки в современном сейсмическом режиме [Leonard, 2010]. Для оценок  $M_{\max}$  были использованы два варианта формул. Вариант 1 взят в виде известного соотношения [Ризниченко, 1976]:  $\lg(L) = -2.266 + 0.244K$ , где  $K$  – энергетический класс. Магнитуда  $M$  вычислена по формуле  $K = 8 + 1.1M$ , используемой БФ ФИЦ ЕГС РАН. Вариант формулы 2

[Leonard, 2010] имеет вид:  $M = 4.40 + 1.52 \lg(L)$ . В итоге получен следующий сейсмопрогностический результат. При наиболее худшем варианте одномоментного вспарывания косейсмического разрыва в пределах брешы с  $L = 60$  км следует ожидать, согласно формуле 1, землетрясение с  $M_{\max} = 7.8$  ( $K = 16.6$ ), а по формуле 2 – с  $M_{\max} = 7.1$  ( $K = 15.8$ ).

Есть возможность оценить вероятности возникновения подобных землетрясений с применением известного распределения Пуассона, предназначенного для описания редких случайных явлений. Расчеты показали, что вероятность возникновения землетрясения с  $M \geq 7.8$  ( $K = 16.6$ ) в ближайшие 10 и 50 лет сравнительно невелика и составляет  $P = 0.03$  и  $P = 0.16$  соответственно. Для другого энергетически менее опасного события с  $M_{\max} = 7.1$  ( $K = 15.8$ ) вероятность увеличивается. В ближайшие 10 лет она составит  $P = 0.36$ , а за 50 лет ожидания возрастет до значения  $P = 0.89$ . Рассмотренные в данном разделе параметры ожидаемых сценарных землетрясений с  $M = 7.1$  или  $M = 7.8$  представляют несомненный интерес в выяснении социальных и экономических показателей сейсмического риска для г. Ангарска.

**Выводы и заключение.** На основе приведенных сведений о полученной оценке сейсмической опасности для г. Ангарска [Фролова и др., 2022] производился расчёт показателей сейсмического риска методом математического моделирования в ГИС «Экстремум». В процедуру оценки показателей сейсмического риска вошли уточненные параметры сейсмической опасности, законов затухания интенсивности сейсмических сотрясений в северо-восточном направлении от сейсмической брешы, а также оценки уязвимости городской застройки; описание свойств элементов риска в базе данных ГИС при учете численности населения и его распределения по объектам разного класса уязвимости. При моделировании поведения зданий использовались обобщенный закон разрушения зданий и региональный закон разрушения на основе шкалы РШСИ–2002. Предполагается, что оценки сейсмического риска для наиболее вероятного ожидаемого землетрясения с энергией  $M = 7.1$  будут полезны для разработки плана реагирования в ближней перспективе при возникновении относительно слабых событий, но с более высокой вероятностью. Результаты оценок для более редкого землетрясения с  $M = 7.8$  могут быть более востребованы при разработке долгосрочного плана проведения превентивных мероприятий для снижения ущерба разрушительных последствий. Дальнейшему повышению надежности и точности оценок параметров подготовки очагов опасных для города землетрясений и показателей риска необходимо проведение инструментального мониторинга в выявленных сейсмоопасных сегментах разломов на сейсмогеодинамических полигонах. Также актуально своевременное проведение паспортизации инженерных жилых и



промышленных сооружений. Упомянутые сведения среднесрочного прогноза необходимы для административных органов управления и МЧС Иркутской агломерации на ближайшую и дальнюю перспективы для разработки мероприятий по снижению ущерба от будущих землетрясений.

*Работа подготовлена в рамках базового проекта «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии», № FWEF-2021-0009 и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН по гранту № 075-15-2021-682.*

### **Литература**

- Писаренко В.Ф., Ружич В.В., Скоркина А.А., Левина Е.А. Структура сейсмического поля Байкальской рифтовой зоны // Физика Земли. 2022. № 3. С. 1–19. DOI:10.31857/S000233372203005X
- Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.
- Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Савельева В.Б., Травин А.В. О формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Часть II. Глубинный уровень // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 1039–1061. DOI:[10.5800/GT-2018-9-3-0383](https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0383)
- Ружич В.В., Левина Е.А. О разработке сейсмогеологического подхода к среднесрочному прогнозу землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Динамические процессы в геосферах. 2022. № 1. С. 11–28. DOI:[10.26006/22228535\\_2022\\_14\\_1\\_17](https://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_17)
- Фролова Н.И., Малаева Н.С., Ружич В.В., Бержинская Л.П., Левина Е.А., Суцев С.П., Ларионов В.И., Угаров А.Н. Оценка социальных и экономических показателей сейсмического риска на примере г. Ангарск // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 2. С. 86–113. DOI:[10.21455/GPB2022.2-5](https://doi.org/10.21455/GPB2022.2-5)
- Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 6. С. 936–941.
- Leonard M. Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release // Bulletin of the Seismological Society of America. 2010. V. 100. No 5A. P. 1971–1988. DOI:[10.1785/0120090189.0189](https://doi.org/10.1785/0120090189.0189)

### **ON THE USE OF MEDIUM-TERM FORECAST DATA FOR THE BAIKAL RIFT ZONE IN SEISMIC HAZARD ASSESSMENTS**

**Ruzhich V.V.<sup>1</sup>, Levina E.A.<sup>1</sup>, Berzhinskaya L.P.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup> *Irkutsk Research Technical University, Irkutsk, Russia*

*E-mail: [ruzhich@crust.irk.ru](mailto:ruzhich@crust.irk.ru)*

УДК 550.34

## ПЛАНЕТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ПРИЧИНА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Сафронов А.Н.

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия*

*E-mail: [safronov\\_2003l@mail.ru](mailto:safronov_2003l@mail.ru)*

(стендовый доклад)

**Аннотация.** В этом исследовании [Safronov, 2022] проводилось изучение геометрии планет Солнечной системы для сильных землетрясений, имеющих магнитуду более 8 баллов ( $M_w > 8+$ ). В [Safronov, 2023] дополнительно изучалась взаимосвязь между сильными землетрясениями и конфигурацией планет для двух последовательных сильных землетрясений, произошедших в Турции 6 февраля 2023 года.

**Ключевые слова:** землетрясение, геометрия планет, древняя сейсмология, рычаг Архимеда, связывание Кеплера, третий закон движения, инерция, гравитационные волны

В этом исследовании [Safronov, 2022] проводилось изучение геометрии планет Солнечной системы для сильных землетрясений, имеющих магнитуду более 8 баллов по шкале Рихтера ( $R8+$ ). Были изучены планетарные конфигурации для 92  $R8+$  землетрясений, произошедших в период с 1900 по 2011 год. Были определены три основные планетарные схемы, а именно: схема обобщенного рычага Архимеда (generalized Archimedes lever, gAL), схема обобщенной конъюнкции Кеплера (generalized Kepler conjunction, gKc), а также новая треугольная схема детектора удаленных космических сигналов (catcher of remote signals, cRS). Было установлено, что  $R8+$  землетрясения имели место при 22 gAL, 42 gKc и 28 cRS, что составляет 23.9%, 45.7% и 30.4% соответственно от общего числа изученных случаев. Показано, что при некоторых землетрясениях геометрия планет была абсолютно идентична, что указывает на универсальность механизма, вызвавшего землетрясение. В [Safronov, 2023] дополнительно изучалась взаимосвязь между сильными землетрясениями и конфигурацией планет для двух последовательных сильных землетрясений, произошедших в Турции 6 февраля 2023 года. Было показано, что во время землетрясений наблюдалось линейное выравнивание планет по линии Юпитер–Венера–Солнце, то есть астрономический триггер принадлежал обобщенной схеме соединения Кеплера (gKc), когда Земля не участвует в схеме линеаризации. На основе многочисленных примеров [Safronov, 2022; 2023] было установлено, что триггерный эффект не зависит от расстояния между планетами и массы планет, поэтому данный механизм был идентифицирован как инерционный гравитационный механизм. Было обращено внимание на тот факт, что эффективность триггерного механизма возрастает с увеличением кратности отношения расстояний между планетами, а также при попарно планетарном параллелизме, что, вероятно, свидетельствует об интерференционной природе инерционных эффектов. На основании принципа планетарного рычага Архимеда и

конъюнкции Кеплера, Третий закон движения был соответствующим образом модифицирован. Было высказано предположение о том, что инерция является частным случаем гравитации, а именно – гравитационной самоиндукцией, которая, как и любая самоиндукция, зависит только от геометрии задачи. Основываясь на исследованиях протуберанцев Солнца, был предложен новый механизм быстрого повышения давления под литосферными плитами Земли за счет генерации гравитационного вихря. По аналогии с солнечными протуберанцами такие гравитационные вихри, эпизодически генерируемые в слое верхней мантии, получили название земных магматических протуберанцев.

### *Литература*

- Safronov A.N.* Astronomical Triggers as a Cause of Strong Earthquakes // International Journal of Geosciences. 2022. V. 13. P. 793–829. DOI:[10.4236/ijg.2022.139040](https://doi.org/10.4236/ijg.2022.139040)
- Safronov A.N.* Kepler's Conjunction for Two Strong Earthquakes in Türkiye in February 2023 // Open Journal of Earthquake Research. 2023. V. 12. P. 27–43. DOI:[10.4236/ojer.2023.122002](https://doi.org/10.4236/ojer.2023.122002)

## **ASTRONOMICAL TRIGGERS AS A CAUSE OF STRONG EARTHQUAKES**

Safronov A.N.

*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [safronov\\_2003@mail.ru](mailto:safronov_2003@mail.ru)*

УДК: 550.34

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕСТ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТИХООКЕАНСКОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЯСА И ЯВАНСКОГО ЖЕЛОБА

Семка М.А., Горшков А.И.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

*Email: [khemul1996@mail.ru](mailto:khemul1996@mail.ru)*

(стендовый доклад)

**Аннотация.** Рассматриваются сильнейшие землетрясения Тихоокеанского сейсмического пояса и Яванского желоба за период с 1900 по 2020 год. Целью исследования является определение характерных морфологических и геофизических признаков мест сильнейших землетрясений зон субдукции Тихого океана и Яванского желоба в Индийском океане. Характерные признаки определялись для окрестностей сильнейших землетрясений, которые произошли за период с 1900 по 2020 г. Землетрясения выбраны из каталога NEIC и по магнитуде были разделены на две группы. В первую группу вошло 15 землетрясений с  $M \geq 8.5$ , а во вторую – 58 землетрясений с  $M = 8.0-8.4$ . Объектами исследования служили круги радиусом 100 км и 300 км, построенные вокруг эпицентров рассматриваемых землетрясений. В пределах этих кругов были определены значения морфологических и геофизических параметров, а также параметры, характеризующие геометрию зон субдукции.

**Ключевые слова:** Тихоокеанский сейсмический пояс, сейсмофокальные разрезы, распознавание характерных признаков

**Объекты распознавания и их параметризация.** В течение последних нескольких десятилетий много исследований проведено с целью изучения факторов, которые контролируют частоту, местоположение и магнитуду сильнейших землетрясений в зонах субдукции [Ando, 1975; Tichelaar, Ruff, 1993; Goes, 1996]. В результате сложилась широко принятая гипотеза, что самые сильные землетрясения происходят в зонах субдукции, где скорость конвергенции плит высока, а возраст погружающейся океанической литосферной плиты значительно меньше возраста прилегающей континентальной плиты. Однако новейшие исследования и особенности мегаземлетрясения 2004 г. на Суматре поставили под сомнение это простое соотношение возраст – скорость [Lay et al., 2005]. Поэтому при разработке параметров для решения нашей задачи мы не стали рассматривать такие параметры, как скорость движения плит и их возраст.

При разработке набора параметров учитывался опыт по решению задач распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений [Горшков, 2010]. Использование гравитационных параметров и характеристик магнитных литосферных аномалий показало их важную роль для идентификации сейсмогенных узлов в ряде регионов Альпийского пояса

[Gorshkov, Soloviev, 2021]. Параметры и пороги их дискретизации для алгоритма Кора-3 представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры, использованные для распознавания характерных признаков, и пороги их дискретизации

Параметры	Пороги дискретизации в круге радиуса 100км	Пороги дискретизации в круге радиуса 300 км
Минимальное значение аномалии Буге, MinG, мГл	91; 198	35; 137
Максимальное значение аномалии Буге, MaxG, мГл	424	488; 566
Градиент аномалии Буге, dG, мГл	267	382; 479
Минимальное значение магнитной аномалии, MinM, нТ	-120	-298; -197
Максимальное значение магнитной аномалии, MaxM, нТ	89; 240	195; 390
Градиент магнитной аномалии, dM, нТ	215; 418	544
Минимальная высота рельефа, MinH, м	-5436	-7642; -6000
Максимальная высота рельефа, MaxH, м	293; 1667	2068
Размах высот, dH, м	6628	8619; 10417
Угол наклона сейсмофокальной зоны, UголZ, градус	38	38
Максимальная глубина зоны субдукции, HmaxZ, км	258	258

### Вертикальные сейсмофокальные разрезы областей сильнейших землетрясений.

Для определения угла наклона сейсмофокальной зоны в полосе шириной 100 км для каждого землетрясения из табл. 1 были построены вертикальные сейсмофокальные разрезы. Учитывались все землетрясения, попадающие в пределы полосы шириной 100 км. На основе разреза для области каждого землетрясения был определен угол наклона сейсмофокальной зоны. Положение профилей, в пределах которых выбирались землетрясения, показано на рис. 1.

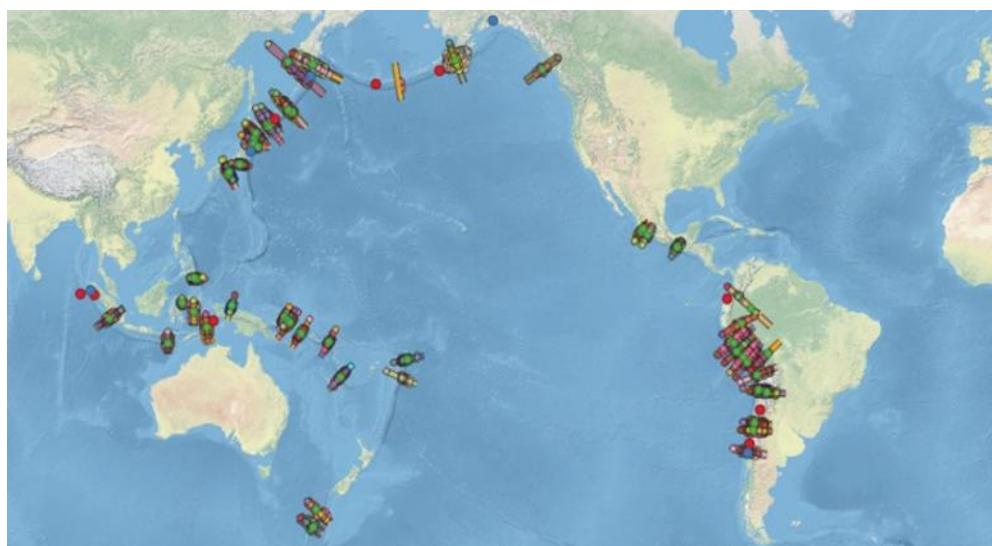


Рис. 1. Эпицентры землетрясений с  $M8+$  и положение профилей, в пределах которых строились сейсмофокальные разрезы

Наклон сейсмофокальной зоны характеризует угол, под которым Тихоокеанская литосферная плита поддвигается под континент относительно горизонта. Измерялся угол в верхней части разреза по его внутреннему краю.

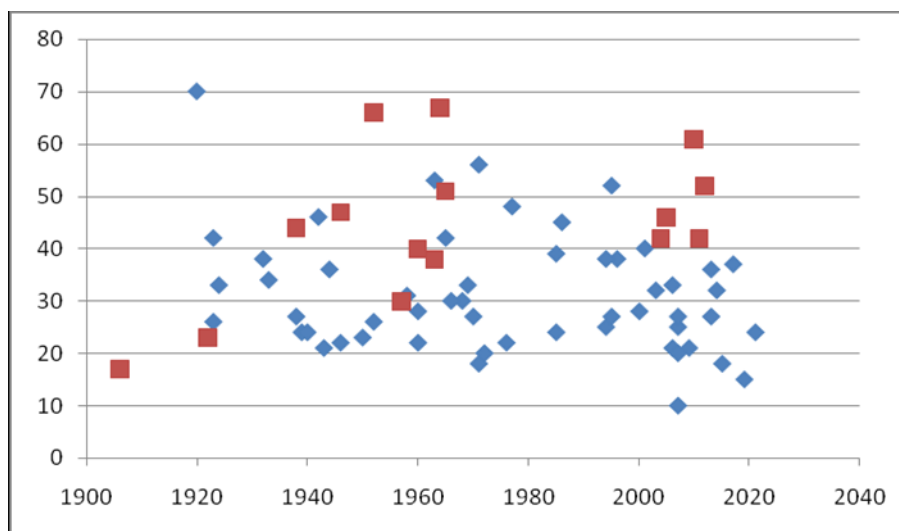


Рис. 2. Распределение землетрясений по углу наклона сейсмофокальных разрезов. Красные квадраты –  $M \geq 8.5$ , синие –  $M = 8.0-8.49$ . Вертикальная ось – угол наклона сейсмофокальных разрезов

На основе анализа одномерных распределений угла наклона сейсмофокальной зоны (рис. 1) установлено, что в районах с  $M \geq 8.5$ , в 12 из 15-ти землетрясений (или 80%) угол наклона погружающейся плиты равен или превышает 40 градусов. Тогда как для абсолютного большинства (83%) мест землетрясений с  $M = 8.0-8.4$  угол наклона сейсмофокальной зоны меньше 40 градусов.

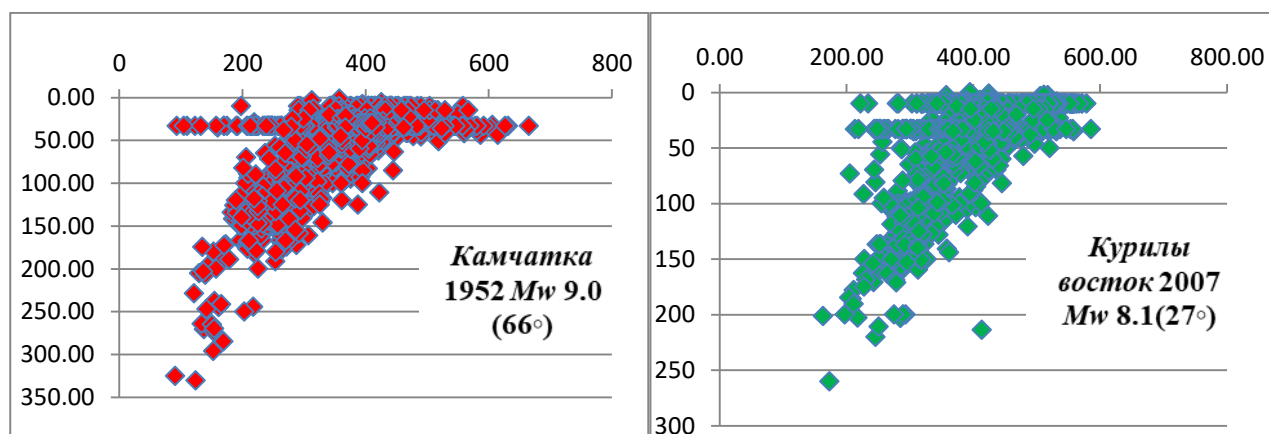


Рис. 3. Примеры вертикальных сейсмофокальных разрезов

На рис. 3 представлены примеры построенных сейсмофокальных разрезов для двух землетрясений Камчатско-Курильского региона.

**Распознавание характерных признаков мест локализации землетрясений с  $M8+$  и  $M8.5+$ .** Поиск характерных признаков мест сильнейших землетрясений проводился в кругах радиуса 100 и 300 км. Ниже приведена таблица для круга радиуса 100 км. Параметры измерялись в пределах этих кругов.

Таблица 2. Характерные признаки мест локализации землетрясений с  $M \geq 8.5$  и  $M = 8.0-8.49$  (круг 100 км)

№	Параметры								
	MaxG, мГл	dG, мГл	MinM, нТ	MaxM, нТ	MinH, м	MaxH м	dH м	UgolZ градус	HmaxZ км
<b>Характерные признаки мест землетрясений <math>M8.5+</math></b>									
1						> 1667	≤ 6628		≤ 258
2				≤ 89			≤ 6628		≤ 258
3					> -5436	≤ 299			≤ 258
4			> -120	> 240					≤ 258
5		≤ 267				> 1667		> 38	
6			> -120			≤ 1667		> 38	
7				> 240	≤ -5436			> 38	
8	≤ 424	≤ 267					> 6628		
9			> -120	> 89	> -5436				
<b>Характерные признаки мест землетрясений <math>M8.0-8.49</math></b>									
1				≤ 240				≤ 38	> 258
2				≤ 240		≤ 1667		≤ 38	
3	> 424							≤ 38	
4		> 267				> 293	> 6628		
5		> 267		0		> 293			
6	> 424.4					> 293			
7		> 267	≤ -120						

Характерные признаки, или критерии сейсмичности, представленные в табл. 2, отражают особенности рельефа и глубинного строения в 100-км окрестностях землетрясений с  $M8.5+$  и  $M = 8.0-8.49$ . Отчетливо видно, что наиболее существенную роль в разделении землетрясений  $M8.5+$  и  $M8.0-8.49$  играют угол наклона сейсмофокальной зоны и мощности зоны субдукции. Для обоих масштабов рассмотрения сильнейшие  $M8.5+$  события характеризуются углом наклона превышающем 38 градусов и одновременно «малой» мощностью зоны субдукции. В гравитационном поле окрестности событий  $M8+$  характеризуются «малыми» значениями градиента аномалии Буге, тогда как для землетрясений  $M8.0-8.49$  оказались свойственны «большие» значения этого градиента. Существенна также роль магнитных аномалий для разделения двух групп землетрясений. Для событий с  $M8.5+$  характерны «большие» значения максимальной магнитной аномалии, а для окрестностей событий  $M8.0-8.49$  типичны «малые» значения этого параметра. В рельефе окрестности землетрясений с  $M8.5+$  характеризуются «большими» значениями минимальной высоты.

### *Литература*

- Горшков А.И.* Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе. М.: КРАСАНД, 2010. 472 с.
- Ando M.* Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai Trough, Japan // *Tectonophysics*. 1975. V. 27. No 2. P. 119–140. DOI:[10.1016/0040-1951\(75\)90102-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(75)90102-X)
- Goes S.* Irregular recurrence of large earthquakes: An analysis of historic and paleoseismic catalogs // *Journal of Geophysical Research*. 1996. V. 101. P. 5739–5749. DOI:[10.1029/95JB03044](https://doi.org/10.1029/95JB03044)
- Gorshkov A.I., Soloviev A.A.* Recognition of earthquake-prone areas in the Altai-Sayan-Baikal region based on the morphostructural zoning // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021. V. 21. ES1005. DOI:[10.2205/2020ES000751](https://doi.org/10.2205/2020ES000751)
- Lay T., Kanamori H., Ammon C.J., Nettles M., Ward S.N. et al.* The Great Sumatra-Andaman earthquake of 26 December 2004 // *Science*. 2005. V. 308. P. 1127–1133. DOI:[10.1126/science.1112250](https://doi.org/10.1126/science.1112250)
- Tichelaar B.W., Ruff L.J.* Depth of seismic coupling along subduction zones // *Journal of Geophysical Research*. 1993. V. 98. P. 2017–2037. DOI:[10.1029/92JB02045](https://doi.org/10.1029/92JB02045)

## **GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL FEATURES OF THE SITES OF THE STRONGEST EARTHQUAKES IN THE PACIFIC SEISMIC BELT AND THE JAVA TRENCH**

Semka M.A., Gorshkov A.I.

*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

*Email: [khemul1996@mail.ru](mailto:khemul1996@mail.ru)*



УДК 550.34

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАПИСЕЙ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ КУЛТУКСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Скоркина А.А.

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

*E-mail: [anna@mitp.ru](mailto:anna@mitp.ru)*

(стендовый доклад)

**Аннотация.** В задачах оценки возможного сейсмического воздействия на определенной территории важнейшую роль играет накопленный материал инструментально записанных сильнейших землетрясений своего региона. Так, для города Иркутска важными являются записи акселерометров Култукского землетрясения  $M_w = 6.3$  (27 августа 2008 года), полученные в ближней зоне. В работе приведены очаговые спектры.

**Ключевые слова:** Култукское землетрясение, очаговый спектр

Традиционный подход к учету сейсмических воздействий заключается в применении региональных эмпирических зависимостей, например, максимальной амплитуды ускорений или других параметров от расстояния и магнитуды ([Антикаев, 2012] и др.). При этом большинство таких эмпирических зависимостей получены по набору информации о землетрясениях умеренных магнитуд с ограниченного диапазона расстояний (связанных с апертурой сейсмических сетей), а далее такие зависимости экстраполируются на большие магнитуды с допущениями.

Другая проблема, с которой столкнулся традиционный подход эмпирического учета сейсмических воздействий, – это сложность очагового процесса, которая приводит к получению нескольких характерных магнитуд/глубин/расстояний для одного и того же землетрясения. В настоящее время признано, что описание очага сильного землетрясения функцией точечного источника позволяет получить только «кажущиеся» характеристики очага, так как сам очаг имеет сложную структуру и, соответственно, характеризуется сложной функцией источника (например, функцией производной сейсмического момента по времени, seismic moment rate), что в первую очередь проявляется на близких расстояниях и должно быть учтено при получении оценок сейсмической опасности.

Именно по этой причине каждое сильное землетрясение, инструментально зарегистрированное на близких гипоцентральных расстояниях, должно изучаться детально, в широком диапазоне частот, и далее спектральные характеристики необходимо учитывать при оценке возможного сейсмического воздействия на территории (особенно, когда речь идет в терминах пиковых ускорений).

Для территории Байкальской рифтовой зоны одним из таких уникальных землетрясений стало Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. ( $M_w^{GCMT} = 6.3$ , 76 км от станции «Иркутск»). Землетрясение записано двумя приборами сильных движений (IRK и TLY) на расстояниях менее 100 км.

В связи с отсутствием детальной информации о скоростном профиле верхней части разреза, было введено допущение о разнице в приповерхностном слое  $k_0$ , соответствующее имеющемуся описанию грунтовых условий (см. табл.). Детальная информация о принятой скоростной модели и модели затухания в [Skorkina, 2023].

Полученные очаговые спектры (рис. 1) указывают на наличие в данных высокочастотного спада  $f_{max}$ , вероятно, очаговой природы.

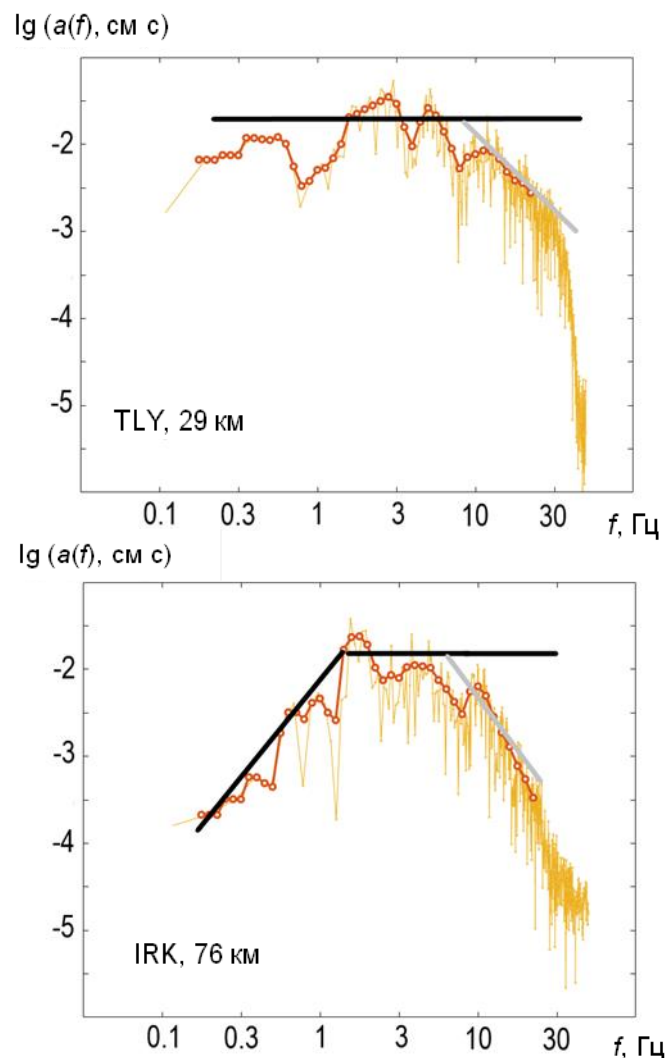


Рис. 1. Спектры ускорений (оригинальный и сглаженный) для станций TLY и IRK. Черными линиями обозначен теоретический спектр, соответствующий модели Бруна, серым цветом – теоретическая модель с высокочастотным спадом  $f_{max}$  очаговой природы

Таблица. Информация о сейсмических станциях

Код станции	Широта	Долгота	Грунтовые условия	Примерное $k_0$
TLY	51.681	103.644	Глыбы, щебень, дресва до 5 м, мраморы, сланцы	0.012
IRK	52.243	104.271	Суглинки микропористые до 13 м	0.02

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 20-17-00180п с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

### Литература

Антикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. Москва: Наука и образование, 2012. 176 с. ISBN 978-5-906235-02-2

Skorkina A.A. Modeling of strong ground motion within the Baikal Rift Zone: the Irkutsk case // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. V. 23. No 4. DOI:[10.2205/2023es000823](https://doi.org/10.2205/2023es000823)

## SPECTRAL CHARACTERISTICS OF STRONG GROUND MOTIONS USING THE EXAMPLE OF THE KULTUKSKOE EARTHQUAKE

Skorkina A.A.

*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

*E-mail: [anna@mitp.ru](mailto:anna@mitp.ru)*

УДК 550.34.01 + 550.348.433

## СТАДИЙНОСТЬ ПРОЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ КАМЧАТКИ, ЯПОНИИ И ИСЛАНДИИ

Смирнов В.Б.<sup>1,2</sup>, Петрушов А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

E-mail: [vs60@mail.ru](mailto:vs60@mail.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** Представлены результаты выявления стадийности проявления аномалий параметров сейсмического режима перед землетрясениями различных магнитуд. Под стадийностью понимается соотношение времен формирования и развития аномалий различных параметров сейсмического режима. Для анализа отобраны землетрясения в областях с двумя генеральными тектоническими типами: в зоне субдукции (Камчатка и Япония) и в рифтовой зоне (Исландия). В качестве параметров сейсмического режима рассматривались наклон графика повторяемости и комплексный параметр, известный как RTL. Пространственно-временные аномалии выявлялись перед отобранными землетрясениями на основе известных «образов предвестников» параметров сейсмического режима. Сопоставление длительностей выявленных аномалий показало, что аномалии наклона графика повторяемости возникают, в целом, раньше, чем аномалии RTL. Высказаны предположения о возможной причине такой стадийности проявления аномалий. В окрестности изученных землетрясений оценивалось также изменение параметра концентрации сейсмогенных разрывов в пределах соответствующих сейсмических циклов. Сопоставление времен возникновения выявленных аномалий сейсмического режима с соответствующими этим временам значениями параметра концентрации сейсмогенных разрывов показало, что формирование аномалий сейсмического режима происходит на стадии, когда состояние системы накопившихся за время сейсмического цикла сейсмогенных разрывов практически достигло критического значения.

**Ключевые слова:** сейсмический режим, сейсмические аномалии, стадийность

В качестве параметров сейсмического режима рассматривались наклон графика повторяемости  $b$  и комплексный параметр RTL [Соболев и др., 1996]. В окрестности изученных землетрясений оценивалось также изменение параметра концентрации сейсмогенных разрывов в пределах соответствующих сейсмических циклов [Завьялов, 2006]. Для анализа отбирались те землетрясения, перед которыми выявляются надежные аномалии сейсмического режима. Отметим, что авторы не ставили перед собой задачу разработки или модификации прогностических алгоритмов и их практического применения. На настоящем этапе исследование было направлено только на сопоставление пространственно-временных областей проявления сейсмических аномалий и выяснение закономерностей следования аномалий во времени.

Длительности выявленных аномалий (интервалы времени от начала аномалий до момента землетрясения) приведены в табл. 1 и представлены графически на рис. 1.

Таблица 1. Длительности аномалий параметров  $b$ , RTL и их разность

Регион	Дата	Магнитуда	Длительность аномалии $b$ ( $T_b$ ), год	Длительность аномалии RTL ( $T_{RTL}$ ), год	$T_b - T_{RTL}$ , год
Камчатка	02.03.1992	6.2	1.42	1.71	-0.29
	08.06.1993	6.4	4.55	2.56	1.99
	12.11.1993	6.2	4.77	3.52	1.25
	05.12.1997	6.6	2.04	1.31	0.73
	20.02.2011	5.9	2.74	2.57	0.17
	28.02.2013	6.5	2.42	2.17	0.25
	<b>Медиана</b>	<b>6.3</b>	<b>2.58</b>	<b>2.36</b>	<b>0.49</b>
Япония	04.10.1994	8.1	2.24	0.98	1.26
	25.09.2003	8.0	3.41	1.79	1.62
	11.03.2011	9.1	2.86	0.95	1.91
	<b>Медиана</b>	<b>8.1</b>	<b>2.86</b>	<b>0.98</b>	<b>1.62</b>
Исландия	17.06.2000	5.5	1.3	0.44	0.86
	29.05.2008	5.3	0.63	2.19	-1.56
	20.06.2020	5.6	1.61	1.32	0.29
	<b>Медиана</b>	<b>5.5</b>	<b>1.3</b>	<b>1.32</b>	<b>0.29</b>

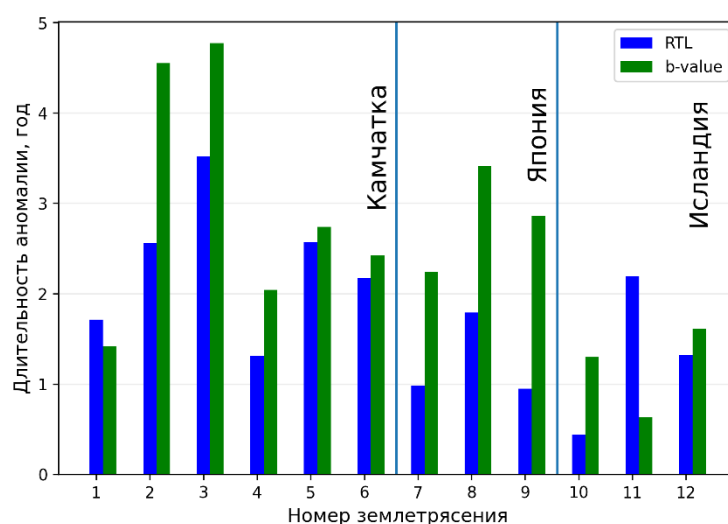


Рис. 1. Длительности аномалий RTL и b-value

Из табл. 1 и рис. 1 следует, что длительности аномалий лежат в диапазоне от полугода до нескольких лет, что типично для среднесрочных предвестниковых аномалий [Соболев, 1993; 2011]. В последнем столбце табл. 1 приведена разность длительностей аномалий параметров  $b$  и RTL. Видно, что для всех землетрясений, кроме двух, эта разность положительна, т. е. аномалия по значениям  $b$  возникает раньше, чем аномалия RTL.

Отобранные землетрясения в трех регионах занимают различные диапазоны магнитуд: 5.3–5.6 для Исландии, 5.9–6.6 для Камчатки и 8.0–9.1 для Японии. На рис. 2 представлена сводка медиан длительностей аномалий и их разностей в зависимости от средней магнитуды согласно данным табл. 1.

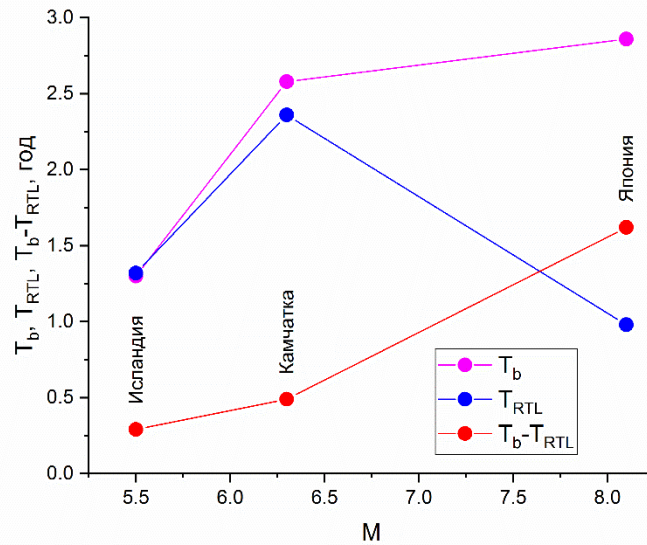


Рис. 2. Средние (медианные) длительности аномалий параметров  $b$  ( $T_b$ ) и RTL ( $T_{RTL}$ ) и их средняя (медианная) разность (по данным табл. 1)

На рис. 2 видно, что длительности аномалий параметра  $b$  для наиболее слабых землетрясений (Исландия) меньше, чем длительности для более сильных землетрясений Камчатки и Японии. Какие-либо систематические различия длительностей аномалий RTL не видны. Разница длительностей аномалий  $b$  и RTL увеличивается с увеличением магнитуды.

Отметим, что небольшая статистика изученных землетрясений не позволяет пока сделать статистически обоснованное заключение о наличии или отсутствии различия длительностей аномалий перед землетрясениями разных магнитуд. Кроме того, мы не можем пока разделить возможные зависимости параметров аномалий от магнитуды и их возможные региональные особенности в зонах субдукции (Камчатка и Япония) и в рифтовой зоне (Исландия).

Параметр концентрации сейсмогенных разрывов можно рассматривать как показатель неустойчивости системы накапливающихся разрывов [Смирнов, Завьялов, 1996]. В табл. 2 представлены отношения значений  $K_{cp}$ , приходящихся на время начала аномалии, к критическому значению  $K_{cp}^*$  в момент основного землетрясения.

В табл. 2 видно, что значения  $K_{cp}$  в моменты возникновения аномалий  $b$  и RTL в среднем отличаются от критических значений  $K_{cp}^*$  (превосходят их) не более, чем на 5%. Такое отличие можно считать малым по сравнению с диапазоном изменения  $K_{cp}$  в пределах соответствующего сейсмического цикла (последний столбец в табл. 2). Это означает, что аномалии по значениям параметров  $b$  и RTL возникают, когда концентрация сейсмогенных разрывов близка к критическому значению.

Сопоставление длительностей аномалий наклона графика повторяемости  $b$  и параметра RTL позволило выявить стадийность их проявления. Аномалии параметра  $b$

в целом обнаруживаются раньше, чем аномалии RTL. Вопрос о природе и механизмах формирования такой стадийности является открытым, наши предположения на эту тему высказаны в [Смирнов, Петрушов, 2023].

Таблица 2. Соотношение значений концентраций сейсмогенных разломов.  $K_{cp}$  в моменты начала аномалий  $b$  и RTL и в момент времени землетрясения

Регион	Дата	Магнитуда	$K_{cp}^b/K_{cp}^*$	$K_{cp}^{RTL}/K_{cp}^*$	$K_{cp}^0/K_{cp}^*$
Камчатка	02.03.1992	6.2	1.026	1.031	4.01
	08.06.1993	6.4	1.025	1.014	6.55
	12.11.1993	6.2	1.037	1.029	4.87
	05.12.1997	6.6	1.015	1.009	4.89
	20.02.2011	5.9	1.019	1.016	4.42
	28.02.2013	6.5	1.010	1.009	7.63
Япония	04.10.1994	8.1	1.041	1.010	1.93
	25.09.2003	8.0	1.094	1.044	2.91
	11.03.2011	9.1	1.056	1.002	3.83
Исландия	17.06.2000	5.5	1.026	1.002	2.14
	29.05.2008	5.3	1.010	1.023	2.44
	20.06.2020	5.6	1.098	1.083	4.00
<b>Среднее</b>			<b>1.038</b>	<b>1.023</b>	<b>4.14</b>

$K_{cp}^*$  – критическое значение  $K_{cp}$  в момент землетрясения;  $K_{cp}^b$  – значение  $K_{cp}$  в момент начала аномалии параметра  $b$ ;  $K_{cp}^{RTL}$  – значение  $K_{cp}$  в момент начала аномалии RTL;  $K_{cp}^0$  – значение  $K_{cp}$  в начале сейсмического цикла.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 23-27-00067 «Стадийность проявления аномалий сейсмического режима перед сильными землетрясениями».

### Литература

- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
- Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. Концентрационный критерий разрушения с учётом фрактального распределения разрывов // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 75–80.
- Смирнов В.Б., Петрушов А.А. Стадийность проявления аномалий сейсмического режима перед землетрясениями Камчатки, Японии и Исландии // Физика Земли. 2023. № 5. С. 62–78.
- Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН, 2011. 56 с.
- Соболев Г.А. Физические основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С., Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. Способ среднесрочного прогноза землетрясений // Доклады РАН. 1996. Т. 347. № 3. С. 405–407.

## STAGING OF OCCURRENCE OF SEISMICITY ANOMALIES BEFORE EARTHQUAKES IN KAMCHATKA, JAPAN AND ICELAND

Smirnov V.B.<sup>1,2</sup>, Petrushov A.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

E-mail: [vs60@mail.ru](mailto:vs60@mail.ru)

УДК 550.34.01 + 550.348.433

## ОБ RTL-АНОМАЛИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ В ТУРЦИИ 06.02.2023

Смирнов В.Б.<sup>1,2</sup>, Петрушов А.А.<sup>1,2</sup>, Михайлов В.О.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

E-mail: [vs60@mail.ru](mailto:vs60@mail.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** На основе данных регионального каталога землетрясений Турции и сводного каталога ANSS для территории Турции и части Ирана проведен апостериорный анализ RTL-аномалий сейсмического режима перед разрушительным Пазарджыкским землетрясением  $M_w 7.8$  06.02.2023 в Турции и для сравнения перед землетрясениями  $M_w 7.1$  23.10.2011 (Восточная Турция),  $M_w 7.3$  12.11.2017 (Иран),  $M_w 6.7$  24.01.2020 (Восточно-Анатолийский разлом). Соотнесены размеры полученных RTL-аномалий с типичными их размерами для землетрясений в Турции того же диапазона магнитуд. Размер аномалии перед Пазарджыкским землетрясением оказался меньше ожидаемого, характерного для землетрясений  $M7+$ . Выдвинуто предположение о том, что обнаруженная RTL-аномалия отражает формирование только первого, относительно небольшого сегмента очага Пазарджыкского землетрясения.

**Ключевые слова:** сейсмический режим, сейсмические аномалии, Пазарджыкское землетрясение

Пазарджыкское землетрясение (Pazarcik earthquake) 06.02.2023 с магнитудой  $M_w 7.8$  явилось сильнейшим землетрясением в Восточно-Анатолийской зоне разломов (ВАЗР) за период инструментальных наблюдений. Исследования по физике процессов подготовки очагов землетрясений и мировая практика прогностических исследований свидетельствуют, что перед такими землетрясениями уверенно выявляются среднесрочные прогностические аномалии, по крайней мере, при апостериорном анализе [Завьялов, 2006; Соболев, 1993]. Целью настоящей работы было апостериорное исследование вопроса о наличии или отсутствии аномалии сейсмического режима перед Пазарджыкским землетрясением.

В качестве параметра сейсмического режима использовался комплексный параметр, впервые введенный в практику сейсмологических исследований в 1996 году и получивший впоследствии достаточно широкое распространение. Аномалии RTL наблюдаются, как правило, в диапазоне на несколько единиц меньших, чем магнитуда основного землетрясения. Характерные длительности RTL-аномалий составляют от нескольких месяцев до нескольких лет, по-видимому, в зависимости от величины землетрясения.



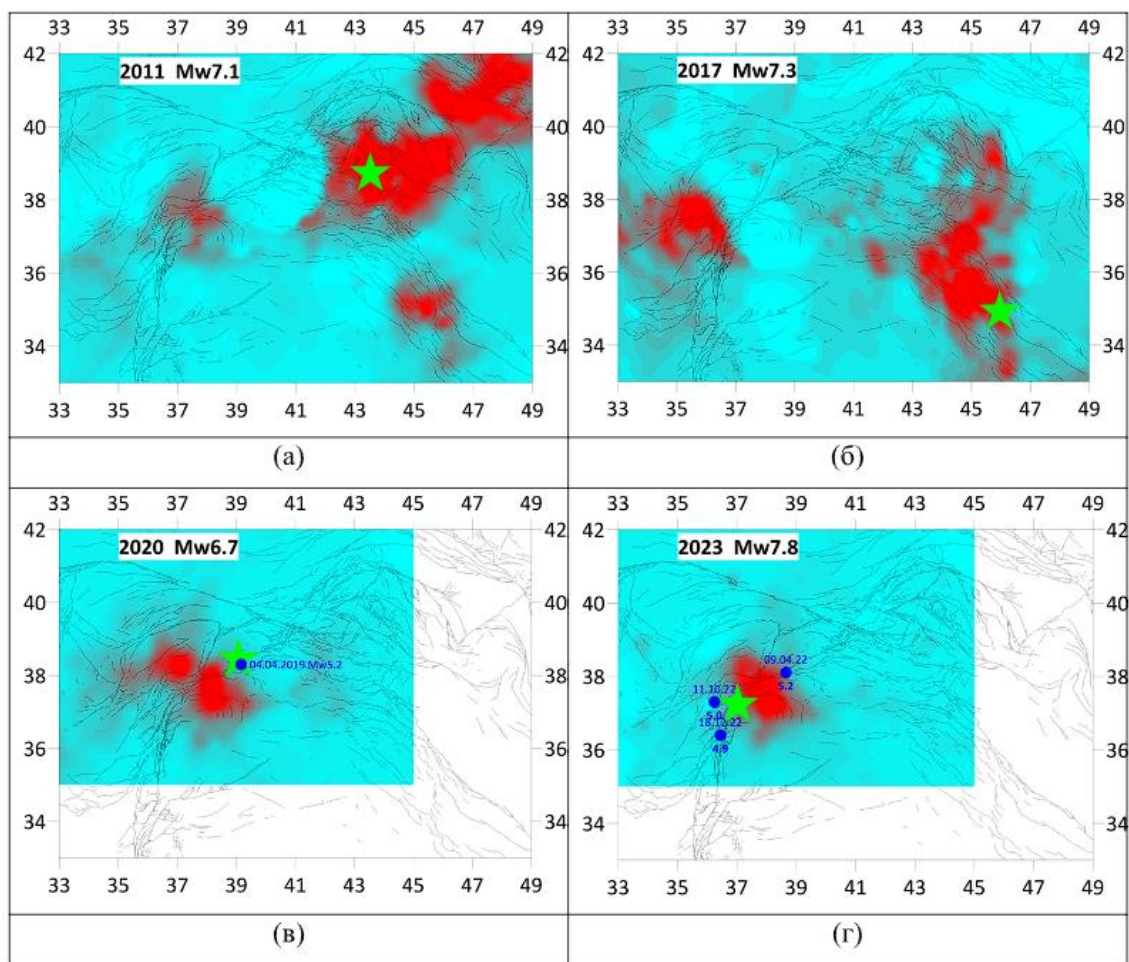


Рис. 1. Карты RTL. Год и магнитуда землетрясения подписаны сверху карт

Апостериорно перед Пазарджыкским землетрясением уверенно выделяется аномалия RTL, отвечающая известному типичному образу предвестника: затишье (уменьшение RTL) с последующей активизацией (увеличение RTL). Стадия активизации завершилась выраженными форшоками, уверенно выделяемыми по пикам кривой RTL [Смирнов, Петрушов, 2023а; 2023б].

Пространственный размер RTL-аномалии перед Пазарджыкским землетрясением  $M_w7.8$  в полтора раза меньше размера очага землетрясения и в полтора-два раза меньше размера аномалий перед другими региональными землетрясениями с магнитудами более 7. Он соответствует размеру аномалии перед землетрясением  $M_w6.7$ , произошедшем на том же разломе. В качестве гипотезы о причине несоответствия размера аномалии перед Пазарджыкским землетрясением  $M_w7.8$  размерам, характерным для землетрясений  $M7+$ , выдвинуто предположение о том, что обнаруженная RTL-аномалия отражает формирование только первого, относительно небольшого сегмента очага Пазарджыкского землетрясения. Размер этого сегмента и накопленный при его вспарывании сейсмический момент отвечают землетрясению с магнитудой  $M_w6.7$ . С такой магнитудой согласуется размер обнаруженной RTL-аномалии.

Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда № 23-27-00067.

### *Литература*

- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
- Смирнов В.Б., Петрушов А.А. Об RTL-аномалии сейсмического режима перед землетрясением в Турции 06.02.2023 г. // Физика Земли. 2023а. № 6. С. 122–132.
- Смирнов В.Б., Петрушов А.А. Стадийность проявления аномалий сейсмического режима перед землетрясениями Камчатки, Японии и Исландии // Физика Земли. 2023б. № 5. С. 62–78.
- Соболев Г.А. Физические основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 314 с.

### **THE RTL ANOMALY OF SEISMICITY BEFORE THE FEBRUARY 6, 2023 EARTHQUAKE IN TURKEY**

Smirnov V.B.<sup>1,2</sup>, Petrushov A.A.<sup>1,2</sup>, Mikhailov V.O.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

E-mail: [vs60@mail.ru](mailto:vs60@mail.ru)

УДК 550.38/34

## ГЕОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ $M_w = 7.5-7.8$ В ТУРЦИИ 6 ФЕВРАЛЯ 2023 ГОДА

Соловьев А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

E-mail: [a.soloviev@gcras.ru](mailto:a.soloviev@gcras.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** Исследуется отклик в вариациях геомагнитного поля, вызванный серией землетрясений с магнитудами  $M_w = 7.5-7.8$  в Турции 6 февраля 2023 года. В качестве исходных данных использованы высокоточные наблюдения геомагнитного поля с 1-секундным временным разрешением, зарегистрированные на магнитных обсерваториях РФ и ближнего зарубежья от умеренных до высоких широт. В работе анализируются морфология геомагнитного сигнала, его амплитудно-частотные характеристики, всплески скорости изменения и задержки в отклике геомагнитного поля на землетрясения с магнитудой  $M_w \geq 7$  в зависимости от расстояния до очага. С учетом рассчитанных скоростей распространения электромагнитного сигнала обсуждаются возможные механизмы данного эффекта.

**Ключевые слова:** землетрясения, сейсмоэлектромагнитные эффекты, геомагнитное поле, геомагнитная активность, магнитные обсерватории, ИНТЕРМАГНЕТ

Несмотря на подробную изученность сейсмичности регионов сочленения крупных тектонических плит, по-прежнему остаются недостаточно исследованными механизмы воздействия землетрясений и сопутствующих процессов, протекающих в литосфере, на геомагнитное поле. Считается, что такое воздействие может быть обусловлено растрескиванием горных пород, переменными движениями в поровом флюиде, разрядами статического электричества и т. п., приводящим к генерации сейсмических, акустических, атмосферных гравитационных волн, изменению полного электронного содержания ионосферы и электромагнитным УНЧ-возмущениям. Сравнительно недавно появилась отдельная область исследований в этом направлении – сейсмоэлектромагнетизм. Соответствующие эффекты можно наблюдать именно в секундных данных, регистрация которых с приемлемой точностью началась не так давно. В 1-минутных наблюдениях, регистрация которых была начата существенно раньше, они сглаживаются и становятся незаметными. Цель работы заключается в изучении геомагнитного эффекта от состоявшегося землетрясения с магнитудой  $M_w \geq 7$ .

В качестве исходных данных рассматривались высокоточные геомагнитные наблюдения, регистрируемые магнитными обсерваториями. Отбор обсерваторий осуществлялся по следующим критериям:

1. Наличие измерений геомагнитного поля с 1-секундным интервалом.

2. Отсутствие в данных пропусков за время основных толчков 6 февраля 2023 г.

3. Достаточная близость к очагам землетрясений 6 февраля 2023 г., позволяющая детектировать искомый геомагнитный эффект в данных.

На исходных записях исследуемый геомагнитный эффект представляет собой сигнал с частотой  $\sim 0.1$  Гц незначительной амплитуды длительностью от 5 до 15 минут (рис. 1). По своей волновой форме исследуемые вариации сравнимы с естественными флуктуациями геомагнитного поля в таком же частотном диапазоне, включая пульсации типа Pc2-3, что делает затруднительным их детектирование по спектральным характеристикам. Гораздо лучше сигнал выделяется на записях скорости изменения геомагнитного поля  $dB/dt$  в виде сильных изолированных всплесков с последующим затуханием (рис. 1). Детальное сравнение геомагнитных откликов от землетрясений  $M_w = 7.8$  и  $M_w = 7.5$  6 февраля 2023 г. показало, что их морфология и в исходных данных компонент  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , и в записях их производных  $dB/dt$  идентична для обоих землетрясений.

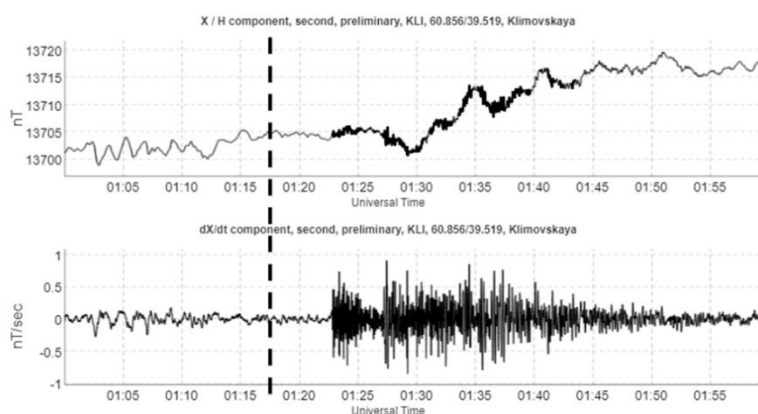


Рис. 1. Вариации (нТл, верхний график) и скорость изменения геомагнитного поля (нТл/с, нижний график) за период 01:00–02:00 UT 6 февраля 2023 г. В качестве примера показаны 1-секундные данные компоненты  $X$ , зарегистрированные на обсерватории KLI (Архангельская обл.). Время первого землетрясения с  $M_w = 7.8$ , произошедшего в 01:17:34 UT, помечено вертикальной пунктирной линией. На верхнем графике темным цветом выделены сейсмогенные вариации, распознанные АПК МАГНУС (<http://geomag.gcras.ru>)

С уменьшением расстояния до эпицентра увеличивается амплитуда сигнала, причем чем ближе обсерватория расположена к эпицентру, тем сигнал более локализован во времени. Наибольшая амплитуда сигнала достигается на записях  $dY/dt$ . На ближайшей к эпицентрам обсерватории «Гюлагарак» (Армения) амплитуда превышает аномальное значение 10 нТл/с; на самой отдаленной от эпицентров обсерватории «Санкт-Петербург» амплитуда  $|dY/dt|$  достигает значения 1 нТл/с. Были рассчитаны временные задержки между землетрясениями 6 февраля 2023 г. и всплесками  $dB/dt$ . Задержка сигнала составляет от 221 до 592 с в зависимости от компоненты магнитного поля и расстояния до эпицентра, которое для выбранных обсерваторий лежит в диапазоне от 765 до 2650 км. На удаленных

обсерваториях запаздывание сигнала в  $Y$ -компоненте больше, чем на компонентах  $X$  и  $Z$ . На обсерваториях, расположенных на аналогичных расстояниях к западу от эпицентров всех рассматриваемых землетрясений, геомагнитный эффект не был обнаружен ни на одной из компонент, что свидетельствует об анизотропии электромагнитного сигнала. Диапазон скоростей распространения электромагнитного сигнала от очага составляет 3–8.5 км/с, что говорит в пользу механизма его генерации синхронно с распространением сейсмической волны против механизма его передачи посредством акустико-гравитационных волн, воздействующих на ионосферу. Представленный анализ дополнительно свидетельствует о востребованности в расширении сети 1-секундных наблюдений геомагнитного поля, требуемых для изучения не только тонких эффектов космической погоды, но и влияния сейсмических событий на вариации геомагнитного поля.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.*

## **GEOMAGNETIC EFFECT OF THE EARTHQUAKES $M_w = 7.5$ – $7.8$ IN TURKEY ON 6 FEBRUARY 2023**

Soloviev A.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Geophysical Center, RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [a.soloviev@gcras.ru](mailto:a.soloviev@gcras.ru)*

УДК 550.34; 535.41

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫМ АКУСТИЧЕСКИМ СЕНСОРОМ В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА GLOBAL DAS MONTH

Спиридонов Е.П.<sup>1</sup>, Никитин С.П.<sup>1,2</sup>, Кислов К.В.<sup>3</sup>, Старовойт Ю.О.<sup>1</sup>,  
Бенгальский Д.М.<sup>1</sup>, Наний О.Е.<sup>1,4</sup>, Трещиков В.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «Т8», г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «Фемтовижн», г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет, г. Москва, Россия

E-mail: [nikitin@t8.ru](mailto:nikitin@t8.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** В период с 1 по 28 февраля 2023 г. проводился международный эксперимент, в котором все желающие участники со всего мира, используя различную аппаратуру DAS, синхронно регистрировали сигналы, возникающие в результате землетрясений с магнитудой  $M > 5$  (по каталогу Геологической службы США USGS). Цель эксперимента заключалась в определении возможного облика глобальной системы DAS для регистрации землетрясений, выявлении узких мест, возникающих при регистрации, хранении и обмене данными, и сопутствующие юридические вопросы. С российской стороны в эксперименте участвовало ООО «Т8 Сенсор». Объем и разнообразие данных, полученных в эксперименте, открывает возможность целого ряда исключительно интересных научных исследований. Приведен предварительный анализ сигналов первых вступлений землетрясений магнитудой 5+, зарегистрированных распределенным акустическим сенсором «Дунай» в течение февраля 2023 г. в рамках международного эксперимента Global DAS Month. Также рассматриваются факторы, от которых может зависеть качество сигнала.

**Ключевые слова:** программно-аппаратный комплекс «Дунай», распределенное акустическое зондирование (DAS), международный эксперимент Global DAS Month, землетрясения в Турции 2023 года, оценка качества сигнала, детектирование первых вступлений

За последнее десятилетие распределенное акустическое зондирование (Distributed acoustic sensing – DAS) превратилось в захватывающую тему в наблюдательной сейсмологии [Кислов, Гравиров, 2022]. DAS может предоставить огромное количество информации, которое невозможно получить с помощью обычных сейсмометров при любой разумной цене.

Конечно, использованию DAS в сейсмологии сопутствуют определённые трудности [Никитин и др., 2023]. Измерения деформации  $\varepsilon = dL/L$  не всегда достаточны для решения многих задач сейсмологии, которые обычно ориентированы на кинематические компоненты движения грунта. DAS регистрирует только осевую деформацию оптоволокну, т. е. каждый его виртуальный «датчик» или «канал» однокомпонентный. Каждый канал DAS имеет более высокий уровень шума, чем обычный широкополосный современный сейсмометр. Однако высокая пространственная плотность многоканальных наблюдений позволяет ожидать

компенсацию этого недостатка за счёт возможностей суммирования или группирования сигналов отдельных каналов.

Тип оптоволоконного кабеля [Zhang et al., 2020] и процедуры установки [Becker et al., 2018] также влияют на амплитудный отклик DAS. Непросто определить передаточную функцию [Lindsey et al., 2020], которая является двумерной функцией частоты и волнового вектора [Jousset et al., 2018] и может быть не одинаковой на разных участках кабеля. Отношение сигнал/шум (ОСШ) на разных участках кабеля также может быть разным.

Под руководством Андреаса Вюстефельда [Wüstefeld, 2023] из независимого исследовательского фонда NORSAR при инициативе и сотрудничестве с Международным Консорциумом IRIS в период с 1 по 28 февраля 2023 г. проводился международный эксперимент, в котором все желающие в разных регионах земного шара, используя различную аппаратуру DAS, одновременно регистрировали сигналы землетрясений с магнитудой  $M > 5$  (по каталогу USGS). Цель эксперимента заключалась в определении возможного облика глобальной системы DAS для мониторинга и анализа телесеизмических событий, выявлении узких мест при регистрации, хранении и обмене данными, сопутствующих юридических трудностей.

Организаторы эксперимента сформулировали следующие требования к регистрации:

- Частота дискретизации: до 100 Гц
- Пространственная выборка: ~20 м
- Длина используемого волокна: от 800 м и длиннее
- Продолжительность записи: 1 час на событие
- Дополнительно 14 февраля 2023 г. была проведена непрерывная регистрация продолжительностью 24 часа с частотой дискретизации 50 Гц.

С российской стороны в эксперименте участвовало ООО «Т8 Сенсор», которое проводит научные исследования в области фотоники и разработки многофункциональных систем технологического мониторинга и охраны. В эксперименте проводилась регистрация сейсмических сигналов с помощью системы DAS «Дунай» собственной разработки. В основе работы системы лежит принцип когерентной рефлектометрии. При этом длина чувствительного элемента (волокна) может быть до 75–100 км (в зависимости от конфигурации). Пространственное разрешение ~10 м. Для проведения эксперимента система «Дунай» была развернута на полигоне Кавказской горной обсерватории ГАИШ.

За время эксперимента во всем мире произошло около 150 землетрясений с магнитудой больше 5. Некоторые из них даже попали в один и тот же часовой интервал записи. Разрушительные февральские землетрясения в Турции также были зафиксированы всеми участниками эксперимента как в относительной близости от места событий, так и на





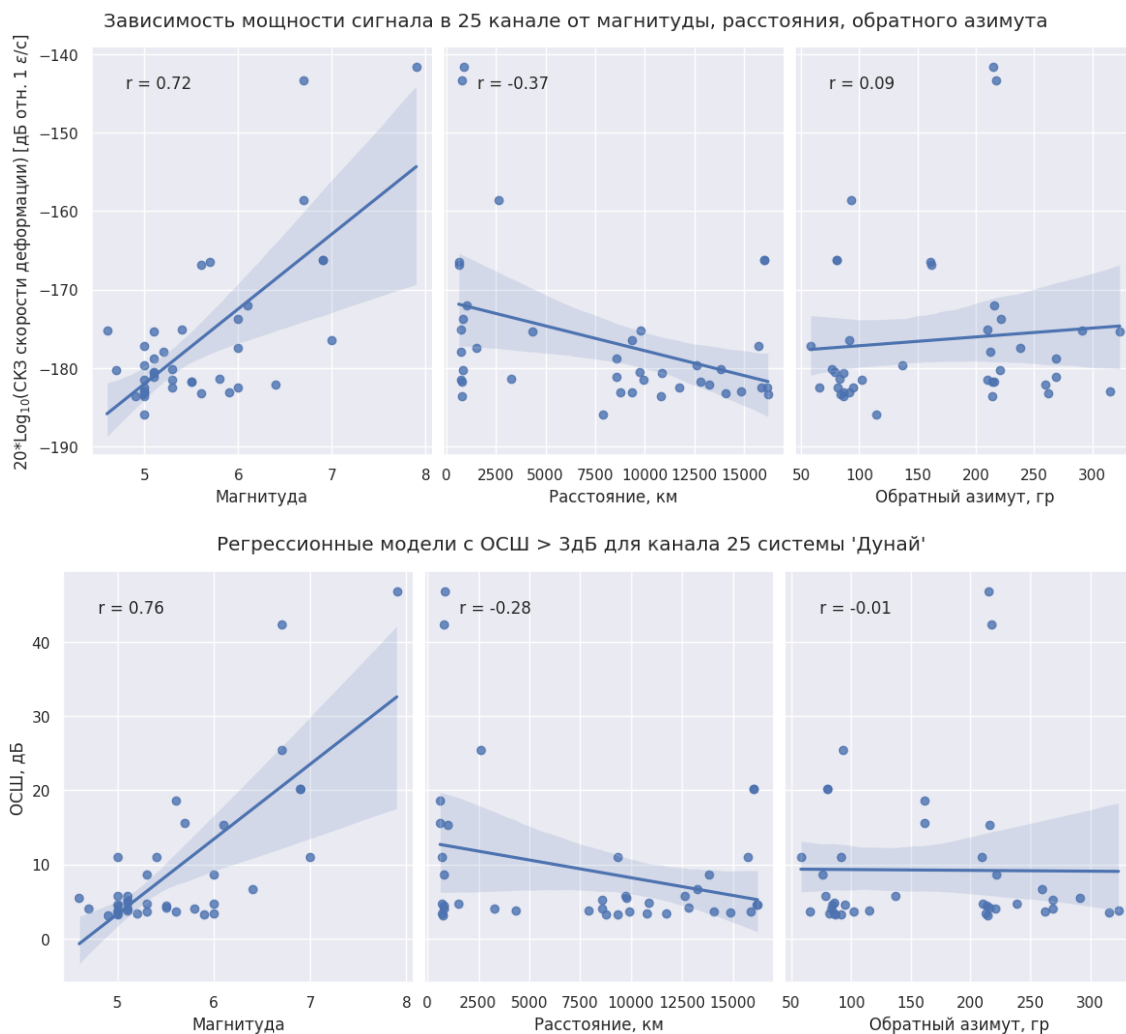


Рис 2. Линейные модели зависимостей мощности сигналов (вверху) и ОСШ (внизу) для исследуемых событий, зарегистрированных системой «Дунай»

Из результатов видно, что значительную положительную корреляцию имеют зависимости мощности и ОСШ от магнитуды события. Для расстояния и угла пока не удалось получить информативных результатов. Одним из факторов, не учтенных в анализе, является то, что системы DAS имеют сложную зависимость диаграммы направленности для различных типов волн, а также от угла между направлением линейного положения сегмента волокна и направлением прихода сейсмической волны. Кроме того, температурные флуктуации вносят значительную погрешность в низкочастотном сейсмическом диапазоне. В дальнейшем анализе планируется учитывать эти факторы. Предварительный анализ результатов участия ООО «Т8 Сенсор» в международном эксперименте по регистрации удалённых землетрясений свидетельствует о широких возможностях привлечения оптоволоконной технологии для решения традиционных задач сейсмического мониторинга. По сути, открывается перспектива применения как линейных, так и иных геометрических конфигураций волокна на земной поверхности для оперативного развертывания сейсмической антенны или группы и, таким образом, получения дополнительной информации о пространственных характеристиках сейсмического волнового поля. Отметим, что волокно является пассивным сейсмическим

датчиком и реализация такого многоканального сбора сейсмической информации не требует дорогостоящих решений по организации электропитания отдельных каналов и цифровой телеметрии в точку сбора. Разработка методик оперативного развёртывания таких систем, например в зонах регистрации афтершоковой активности, может создать серьёзную конкуренцию традиционным методам наблюдений.

### Литература

- Кислов К.В., Гравиров В.В. Распределенное акустическое зондирование: новый инструмент или новая парадигма // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58. № 2. С. 5–38. DOI:[10.21455/si2022.2-1](https://doi.org/10.21455/si2022.2-1)
- Никитин С.П., Кислов К.В., Старовойт Ю.О., Бенгальский Д.М., Спиридонов Е.П., Харасов Д.Р., Фомиряков Э.А., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Возможности и перспективы использования распределенных оптоволоконных датчиков в геофизике // Приборы и техника эксперимента. 2023. № 5. С. 153–158.
- Becker M.W., Ciervo C., Coleman T. Laboratory testing of low frequency strain measured by distributed acoustic sensing // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2018. P. 4963–4966. DOI:[10.1190/segam2018-2997900.1](https://doi.org/10.1190/segam2018-2997900.1)
- Jousset P., Reinsch T., Ryberg T., Blanck H., Clarke A., Aghayev R., et al. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features // Nature communications. 2018. V. 1. P. 1–11. DOI:[10.1038/s41467-018-04860-y](https://doi.org/10.1038/s41467-018-04860-y)
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Travel times for global earthquake location and phase identification // Geophysical Journal International. 1991. V. 105. No 2. P. 429–465. DOI:[10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x)
- Lindsey N.J., Rademacher H., Ajo-Franklin J.B. On the broadband instrument response of fiber-optic DAS arrays // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. V. 125. No 2. Article e2019JB018145. DOI:[10.1029/2019JB018145](https://doi.org/10.1029/2019JB018145)
- Wüstefeld A. Global DAS monitoring month. <https://www.norsar.no/in-focus/global-das-monitoring-month-february-2023>. Последний просмотр 21.04.2023.
- Zhang C.-C., Shi B., Zhu H.-H., Wang B.-J., Wei G.-Q. Toward distributed fiber-optic sensing of sub-surface deformation: A theoretical quantification of ground-borehole- cable interaction // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. V. 125. No 3. Article e2019JB018878. DOI:[10.1029/2019JB018878](https://doi.org/10.1029/2019JB018878)

### PRELIMINARY RESULTS OF THE ANALYSIS OF SIGNALS RECORDED BY A DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSOR AS PART OF AN INTERNATIONAL EXPERIMENT GLOBAL DAS MONTH

Spiridonov E.P.<sup>1</sup>, Nikitin S.P.<sup>1,2</sup>, Kislov K.V.<sup>3</sup>, Starovoit Yu.O.<sup>1</sup>, Bengalskii D.M.<sup>1</sup>,  
Nanii O.E.<sup>1,4</sup>, Treshchikov V.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> OOO T8, Moscow, Russia

<sup>2</sup> OOO Femtovision, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia

<sup>4</sup> Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: [nikitin@t8.ru](mailto:nikitin@t8.ru)

УДК 517.9+532.5+537.84

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО КОНВЕКТИВНОГО МАГНИТНОГО ДИНАМО ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПЛОСКОМ СЛОЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ ЖИДКОСТИ

Толмачев Д.С.

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия

E-mail: [tolmachev@mitp.ru](mailto:tolmachev@mitp.ru)

(устный доклад)

**Аннотация:** Построен алгоритм численного моделирования нелинейного конвективного магнитного динамо во вращающемся плоском слое электропроводной жидкости.

**Ключевые слова:** магнитное поле, тепловая конвекция, псевдоспектральные методы, нелинейное магнитное динамо, инверсия магнитного поля, геомагнитное поле, метод Галёркина

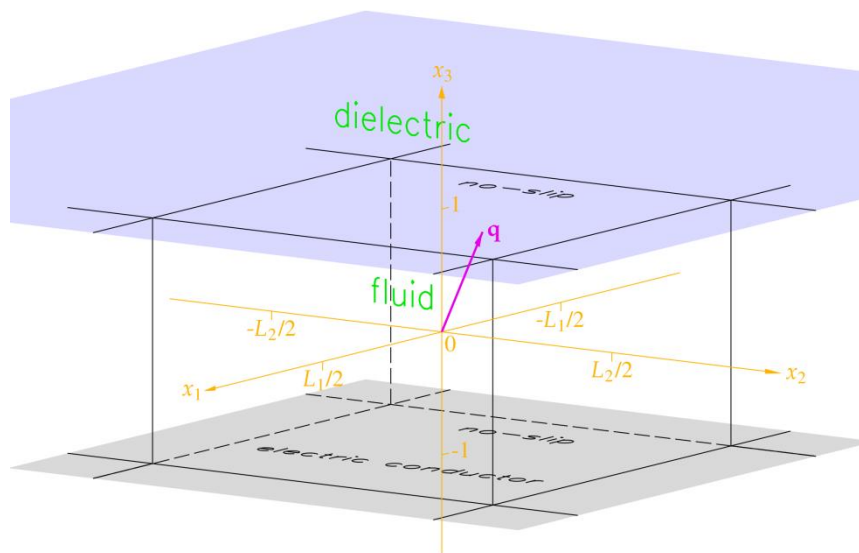


Рис 1. Иллюстративная схема физического процесса. Над верхней границей слоя расположен бесконечный слой диэлектрика, нижняя граница – идеальный проводник. На горизонтальных границах выполнены условия прилипания. Выполнены условия периодичности по горизонтальным декартовым переменным. Слой жидкости вращается вокруг оси, направленной вдоль вектора  $\mathbf{q}$ . Декартова система координат (показана оранжевым цветом) вращается вместе с жидкостью

В работе исследуется генерация магнитного поля тепловой конвекцией в плоском горизонтальном слое жидкости, вращающемся вокруг наклонной оси [Tolmachev et al., 2023]. Процесс описывается следующими уравнениями: Навье – Стокса с силами Архимеда, Кориолиса и Лоренца, теплопроводности и магнитной индукции. Соленоидальные векторные поля (магнитное поле и поле скорости жидкости) разложены в сумму полоидального, тороидального и среднего полей, и выведена система уравнений для их

потенциалов. Для ее численного решения использован метод Галеркина с разложением по базисным функциям, удовлетворяющим соответствующим граничным условиям и имеющим вид произведений гармоник Фурье горизонтальных декартовых переменных и линейных комбинаций полиномов Чебышева вертикальной переменной. Это обеспечивает повышенную точность аппроксимации у границ слоя жидкости. Неортогональность использованных базисных функций потребовала разработать оригинальные методы расчета коэффициентов разложения по таким базисам с максимальной точностью. Для вычисления произведений используются псевдоспектральные методы [Stellmach, Hansen, 2008]. Для интегрирования по времени полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений применяется метод Рунге – Кутты с экспоненциальным дифференцированием 3 порядка [Cox, Matthews, 2002] (выбор этого метода интегрирования связан с жесткостью системы уравнений для коэффициентов разложений).

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00114, <https://rscf.ru/project/22-17-00114>.*

#### *Литература*

- Cox S.M., Matthews P.C. Exponential Time Differencing for Stiff Systems // Journal of Computational Physics. 2002. V. 176. No 2. P. 430–455. DOI:[10.1006/JCPH.2002.6995](https://doi.org/10.1006/JCPH.2002.6995)
- Stellmach S., Hansen U. An efficient spectral method for the simulation of dynamos in Cartesian geometry and its implementation on massively parallel computers // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2008. V. 9. No 5. Article Q05003. DOI:[10.1029/2007GC001778](https://doi.org/10.1029/2007GC001778)
- Tolmachev D., Chertovskih R., Zheligovsky V. Algorithmic Aspects of Simulation of Magnetic Field Generation by Thermal Convection in a Plane Layer of Fluid // Mathematics. 2023. V. 11. No. 4. Article 808. DOI:[10.3390/math11040808](https://doi.org/10.3390/math11040808)

## **NUMERICAL MODELLING OF NONLINEAR CONVECTIVE MAGNETIC DYNAMO IN A ROTATING PLANE LAYER OF ELECTRICALLY CONDUCTING FLUID**

Tolmachev D.

*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

*E-mail: [tolmachev@mitp.ru](mailto:tolmachev@mitp.ru)*

УДК 550.348.436

## ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТУРЕЦКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 6 ФЕВРАЛЯ 2023 ГОДА ПО ТЕЛЕСЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Филиппова А.И.<sup>1,2</sup>, Фомочкина А.С.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

<sup>3</sup> *РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия*

E-mail: [aleirk@mail.ru](mailto:aleirk@mail.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** В данной работе по амплитудным спектрам поверхностных волн проведены расчеты очаговых параметров сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 года ( $M_w = 7.8$  и  $M_w = 7.7$ ) в приближении мгновенного точечного источника и сдвиговой дислокации эллиптической формы. Показано, что очаги исследуемых сейсмических событий сформировались под влиянием регионального поля напряжений, а их фокальные механизмы представляли собой левосторонние сдвиги. Для первого землетрясения наши оценки длительности разрыва и его длины ( $t = 52.5$  с,  $L = 180$  км), вероятно, относятся не ко всему разрыву, а только к его основной фазе. Полученные нами для второго землетрясения значения  $t = 30$  с и  $L = 180$  км характеризуют полностью весь разрыв.

**Ключевые слова:** землетрясение, очаговые параметры, поверхностные волны, Турция

В настоящей работе по записям поверхностных волн, зарегистрированных на телесеизмических расстояниях, для двух сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г. (в 1 ч 18 мин (GMT) с  $M_w = 7.8$  и в 10 ч 24 мин с  $M_w = 7.7$ ) были рассчитаны их очаговые параметры в приближении мгновенного точечного источника и сдвиговой дислокации эллиптической формы [Букчин, 1989; Bukchin, 1995]. В качестве исходных данных использовались записи волн Рэлея и Лява на удаленных широкополосных сейсмических станциях. Для анализа отбирались только волновые формы со станций, расположенных в разных азимутах от эпицентров исследуемых событий, с высоким отношением сигнал/шум и нормальной поляризацией поверхностных волн. Всего для каждого землетрясения были отобраны записи 20 сейсмических станций. Спектры волн Рэлея и Лява определялись с помощью метода спектрально-временного анализа [Левшин и др., 1986]. Для первого землетрясения фильтрация выполнялась на периодах 70–250 с, для второго – 70–210 с.

В приближении мгновенного точечного источника расчеты проводились для полных диапазонов периодов, в которых выполнялась фильтрация. В результате были получены оценки следующих параметров: скалярного сейсмического момента ( $M_0$ ), глубины очага ( $h$ ) и четырех эквивалентных решений фокального механизма, отличающихся направлением простирания и подвижки [Букчин, 1989]. Для нахождения единственного решения фокального механизма дополнительно использовались фазовые спектры поверхностных волн.

В приближении сдвиговой дислокации эллиптической формы расчеты проводились в диапазонах периодов 70–150 с для первого землетрясения и 70–120 с для второго. Всего оценивались шесть интегральных параметров, характеризующих геометрию разрыва и развитие очага во времени: продолжительность процесса в очаге ( $\Delta t$ ), длины большой и малой осей эллипса источника ( $l_{\max}$  и  $l_{\min}$ ), абсолютное значение средней скорости мгновенного центроида ( $v$ ), угол между большой осью эллипса источника и осью простирания ( $\phi_l$ ), угол между направлением движения мгновенного центроида и осью простирания ( $\phi_v$ ) [Букчин, 1995]. Для возможной идентификации истинной плоскости разрыва [Букчин, 2017] расчеты проводились для обеих нодальных плоскостей фокальных механизмов, полученных на предыдущем этапе.

Результаты расчетов очаговых параметров сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г. в приближении мгновенного точечного источника представлены на рис. 1. Скалярный сейсмический момент составил  $M_0 = 6.19 \cdot 10^{20}$  Н·м для первого события и  $M_0 = 4.29 \cdot 10^{20}$  Н·м для второго, что соответствует моментным магнитудам  $M_w = 7.8$  и  $M_w = 7.7$ . Полученные нами фокальные механизмы показывают, что очаги исследуемых землетрясений сформировались под влиянием сжатия СВ-ЮЗ ориентации и растяжения СЗ-ЮВ ориентации (рис. 1а, в). Для глубины очага первого землетрясения нами было получено значение 12 км, причем данный параметр характеризуется хорошим разрешением (рис. 1б). Для второго события глубина в приближении мгновенного точечного источника имела невысокое разрешение – от 6 до 14 км (сплошная кривая на рис. 1г), поэтому глубина была пересчитана с учетом пространственно-временных размеров очага (пунктирная кривая на рис. 1г). В результате оценка глубины составила 8–10 км. В приближении мгновенного точечного источника наши оценки очаговых параметров хорошо согласуются с результатами, опубликованными на текущий момент времени сейсмологическими агентствами и полученными в результате специальных исследований [Филиппова, Фомочкина, 2023].

На рис. 2 приведены частные функции нормированной невязки для шести интегральных параметров очагов исследуемых сейсмических событий, характеризующих геометрию разрывов и их развитие во времени. Для первого из рассматриваемых землетрясений минимальные значения функции нормированной невязки для нодальных плоскостей с простиранием  $63^\circ$  (NP1 на рис. 1а) и  $330^\circ$  (NP2) составили 0.330 и 0.337 соответственно (рис. 2а), что позволяет нам выделить NP1 как истинную плоскость разрыва. Таким образом, это землетрясение представляет собой левосторонний сдвиг с простиранием близким к простиранию зоны Восточно-Анатолийского разлома. Для второго землетрясения для плоскости с простиранием  $270^\circ$  (NP1 на рис. 1в) минимальное значение невязки равняется 0.294, а для NP2 (простирание  $5^\circ$ ) – 0.296 (рис. 2б). Как показывают результаты

наших предыдущих исследований очагов отдельных землетрясений и их тектонической позиции [Фомочкина, Филиппова, 2023; Bukchin et al., 2020; Filippova et al., 2022], даже столь малое отличие невязок позволяет выделить NP1 в качестве истинной плоскости разрыва. Следовательно, второе из рассматриваемых землетрясений представляет собой левосторонний сдвиг по системе разломов Сургу-Чардак.

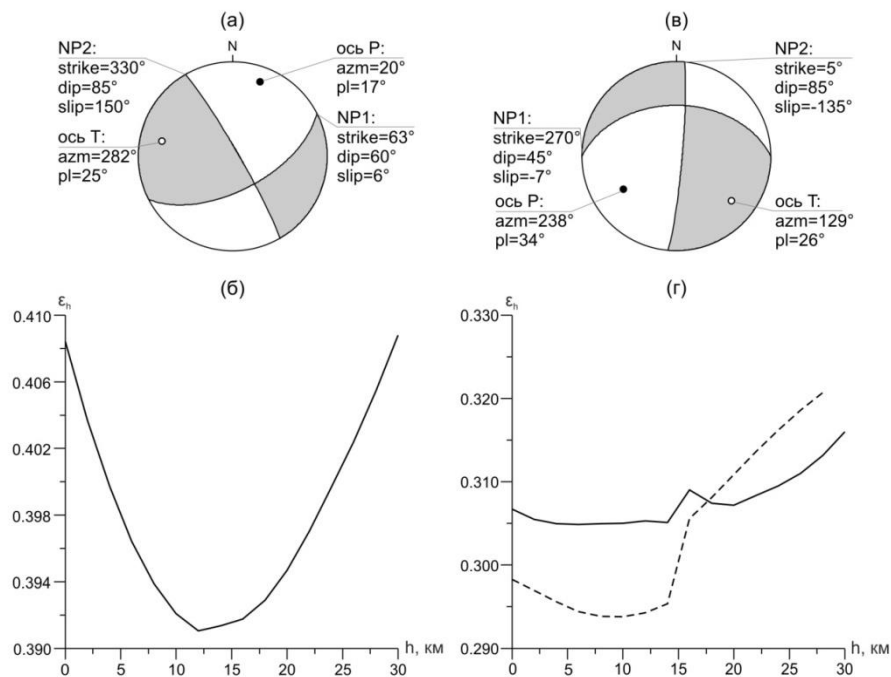


Рис. 1. Очаговые параметры первого (а, б) и второго (в, г) сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г. в приближении мгновенного точечного источника: механизм очага (а, в) и зависимость частной функции нормированной невязки от глубины очага (б, г). Обозначения: NP – нодальная плоскость, ось T/P – ось растяжения/сжатия, strike – направление простирания, dip – угол падения, slip – угол подвижки, azm – азимут, pl – угол погружения. На рис. (г) пунктирная линия соответствует частной функции нормированной невязки, рассчитанной с учетом пространственно-временных размеров очага

Если предположить гауссовское распределение плотности момента и принять в качестве реальных оценок длительности очага и его пространственных размеров значения, соответствующие 99% доверительному уровню, то реальное время действия источника превышает интегральную оценку длительности очага в 2.5 раза, а реальные размеры очаговой области превышают интегральные оценки в 3 раза [Bukchin et al., 2020]. Следовательно, время действия источника ( $t$ ) и длина разрыва ( $L$ ) для первого события составили 52.5 с и 180 км, а для второго – около 30 с и 180 км.

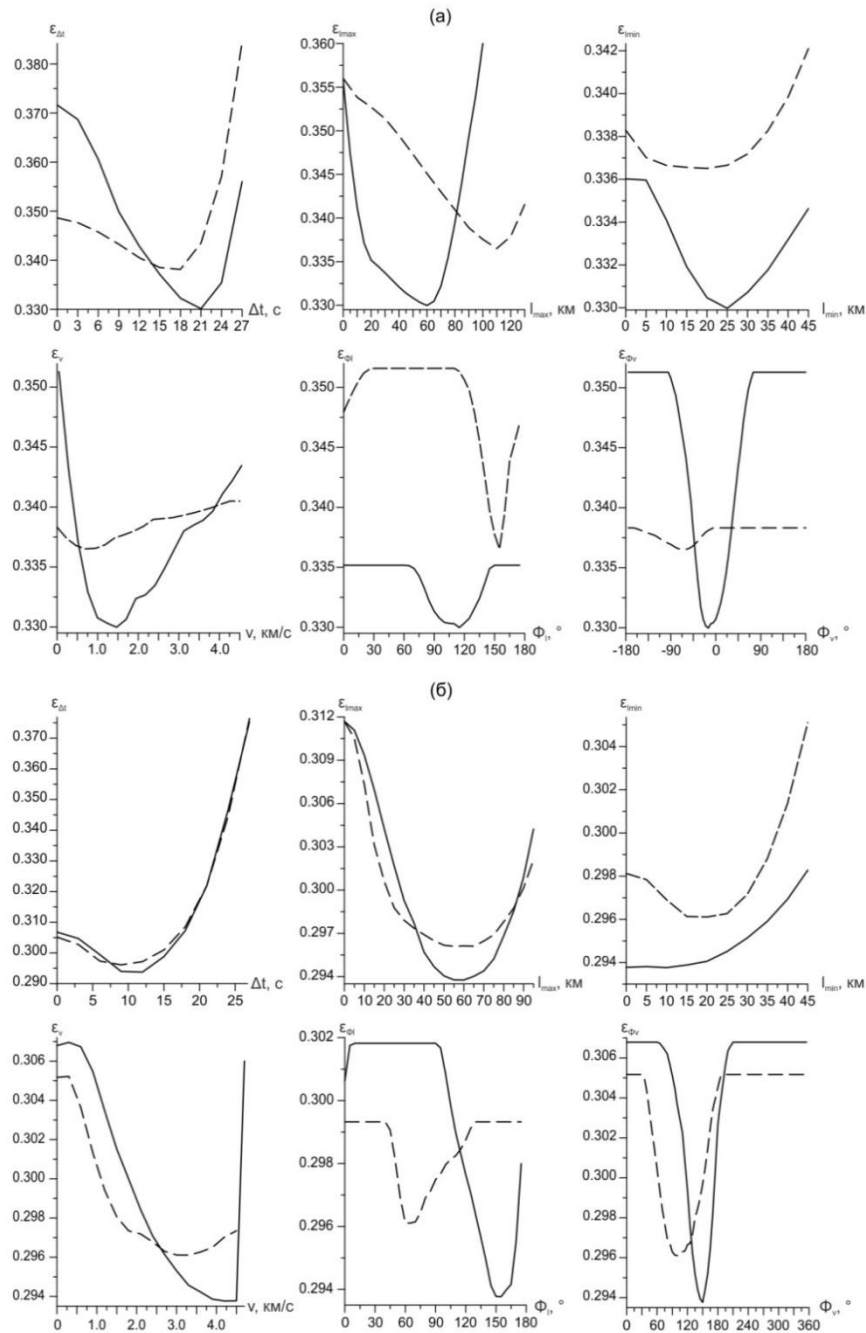


Рис. 2. Частные функции нормированной невязки для интегральных параметров очагов первого (а) и второго (б) сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г., рассчитанные для нодальных плоскостей NP1 (сплошные линии) и NP2 (пунктир, показанных на рис. 1а, в

Рассчитанные в данной работе длительность источника и длина разрыва для первого из рассматриваемых землетрясений ( $t = 52.5$  с,  $L = 180$  км) существенно ниже, чем практически все имеющиеся оценки этих параметров [Филиппова, Фомочкина, 2023]. Судя по полученным нами значениям длительности источника и длины разрыва, а также установленному простиранию плоскости разрыва ( $63^\circ$ ), можно сделать вывод о том, что они описывают не весь разрыв, а только его северо-восточную часть, относящуюся к северо-восточным сегментам Восточно-Анатолийского разлома. Оценки длительности разрыва для этих сегментов по литературным данным составляют около 50 с, а его длины – от 140 до



190 км, что согласуется с нашими результатами. Следует отметить, что эти сегменты характеризуются максимальными смещениями и значениями выделившегося сейсмического момента, то есть они представляют собой основную фазу разрыва. Полученные нами для второго землетрясения значения  $t = 30$  с и  $L = 180$  км близки к большинству оценок, полученных в других работах [Филиппова, Фомочкина, 2023].

### Литература

- Букчин Б.Г. Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // Известия АН СССР. Серия Физика Земли. 1989. № 9. С. 34–41.
- Букчин Б.Г. Описание очага землетрясения в приближении вторых моментов и идентификация плоскости разлома // Физика Земли. 2017. № 2. С. 76–83. DOI:[10.7868/S0002333717020041](https://doi.org/10.7868/S0002333717020041)
- Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В., Букчин Б.Г., Бармин М.П., Ратникова Л.И., Итс Е.Н. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. М.: Наука, 1986. 278 с.
- Филиппова А.И., Фомочкина А.С. Очаговые параметры сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г. ( $M_w=7.8$  и  $M_w=7.7$ ) по данным поверхностных волн // Физика Земли. 2023. № 6. С. 89–102. DOI:[10.31857/S0002333723060078](https://doi.org/10.31857/S0002333723060078)
- Фомочкина А.С., Филиппова А.И. Очаговые параметры Улахан-Чистайского землетрясения 20 января 2013 г. (Якутия) по данным поверхностных волн // Вопросы инженерной сейсмологии. 2023. Т. 50. № 3. С. 17–29. DOI:[10.21455/VIS2023.3-2](https://doi.org/10.21455/VIS2023.3-2)
- Bukchin B. Determination of stress glut moments of total degree 2 from teleseismic surface wave amplitude spectra // Tectonophysics. 1995. V. 248. P. 185–191. DOI:[10.1016/0040-1951\(94\)00271-A](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00271-A)
- Bukchin B.G., Fomochkina A.S., Kossobokov V.G., Nekrasova A.K. Characterizing the foreshock, main shock, and aftershock sequences of the recent major earthquakes in Southern Alaska, 2016–2018 // Frontiers in Earth Science. 2020. V. 8. Article 584659. DOI:[10.3389/feart.2020.584659](https://doi.org/10.3389/feart.2020.584659)
- Filippova A.I., Bukchin B.G., Fomochkina A.S., Melnikova V.I., Radziminovich Ya.B., Gileva N.A. Source process of the September 21, 2020 Mw 5.6 Bystraya earthquake at the south-eastern segment of the Main Sayan fault (Eastern Siberia, Russia) // Tectonophysics. 2022. V. 822. Article 229162. DOI:[10.1016/j.tecto.2021.229162](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229162)

## SOURCE PARAMETERS OF THE TURKISH FEBRUARY 6, 2023 EARTHQUAKES FROM TELESEISMIC DATA

Filippova A.I.<sup>1,2</sup>, Fomochkina A.S.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia

<sup>2</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave  
Propagation, RAS, Moscow, Troitsk, Russia

<sup>3</sup> National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia

E-mail: [aleirk@mail.ru](mailto:aleirk@mail.ru)

УДК 550.34

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИНВЕРСИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВО ВНЕШНИХ ОБЛАСТЯХ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК

Хасаева Т.Т.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия*

*E-mail: [justanyan@yandex.ru](mailto:justanyan@yandex.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** В данной работе изучается возможность формирования пространственных инверсий галактического магнитного поля на больших расстояниях от центра галактики. В рамках модели тонкого диска был рассмотрен ряд конфигураций начального поля, при которых в регулярных структурах поля со временем могут возникнуть однократные или многократные смены направления вектора магнитной индукции в пределах галактического диска (8–10 кпк). При этом особый интерес представляет собой вопрос о возможности формирования таких переходов на больших расстояниях (15–20 кпк) от центра галактики.

**Ключевые слова:** динамо, магнитная гидродинамика, инверсии

Развитие галактического магнитного поля главным образом обусловлено действием механизма динамо, связанного со спиральностью турбулентных движений галактического вещества и дифференциального вращения, в то время как турбулентная диффузия, являясь основным диссипативным эффектом, приводит к размытию крупномасштабных структур поля [*Krause, Rädler, 1980*].

В ряде галактик присутствуют пространственные инверсии магнитного поля [*Van Eck et al., 2011*]. Причины их возникновения на данный момент доподлинно не известны, но существуют основания полагать, что их наличие определяется конфигурацией мелкомасштабного начального поля, которое, с естественной точки зрения, носит случайный характер [*Moss, Sokoloff, 2012*]. Также в предшествующих работах было показано, что структуры галактического магнитного поля со временем приобретают осевую симметрию [*Михайлов и др., 2021*]. Таким образом, инверсии галактического магнитного поля предположительно должны формироваться именно в радиальном направлении.

Так как магнитное поле генерируется главным образом в плоскости галактического диска, а полутолщина спиральной галактики, по крайней мере, на порядок меньше ее радиуса, в данной работе используется планарное приближение, что позволяет в дальнейшем рассмотреть задачу на плоскости.

Ранее было показано, что галактическое магнитное поле может проникать на большие расстояния от центра диска (15–20 кпк) [Mikhailov *et al.*, 2014], в связи с чем особенно интересен вопрос о том, возможно ли формирование в этой зоне инверсий.

Эволюция магнитного поля описывается при помощи векторного уравнения Штеенбека – Краузе – Рэдлера [Krause, Rädler, 1980]. Решение такой задачи в расширенной расчетной области требует существенных вычислительных мощностей. Задачу также осложняет необходимость рассмотрения целого ряда случайных начальных условий для поиска инверсий. Таким образом, для поиска численного решения были использованы методы параллельного программирования, в данном случае, на видеокартах.

В некоторых случаях можно зафиксировать формирование переходных слоев, со временем приобретающих осевую симметрию, что соответствует теоретическим представлениям о протекании упомянутых ранее процессов.

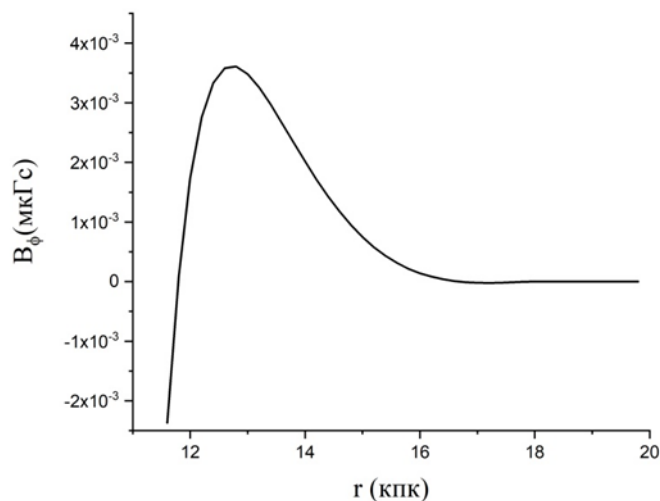


Рис. 1. Зависимость угловой компоненты поля от расстояния до центра галактики на периферии галактического диска

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда № 22-17-00114 «Вычислительные задачи геофизической магнитогидродинамики».

### Литература

- Михайлов Е.А., Хасаева Т.Т., Тепляков И.О. Возникновение контрастных структур для галактического магнитного поля: теоретические оценки и моделирование на видеокартах // Труды Института системного программирования РАН. 2021. Т. 33. № 6. С. 253–264. DOI:[10.15514/ISPRAS-2021-33\(6\)-18](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33(6)-18)
- Krause F., Rädler K.-H. Mean-Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory. Pergamon, Oxford, 1980. 271 pp.
- Mikhailov E., Kasparova A., Moss D., Beck R., Sokoloff D., Zasov A. Magnetic fields near the peripheries of galactic discs // Astronomy and Astrophysics. 2014. V. 568. A66. DOI:[10.1051/0004-6361/201323341](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201323341)

*Moss D., Sokoloff D.* Seed fields for galactic dynamos // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. 2012. V. 27. No 2. P. 319–324.

*Van Eck C.L., Brown J.C., Stil J.M., Rae K., Mao S.A. et al.* Modeling the magnetic field in the galactic disk using new rotation measure observations from the Very Large Array // *The Astrophysical Journal*. 2011. V. 728. No 2. 97. DOI:[10.1088/0004-637X/728/2/97](https://doi.org/10.1088/0004-637X/728/2/97)

## NUMERICAL STUDY OF SPATIAL MAGNETIC FIELD REVERSAL OCCURRENCE IN THE OUTER REGIONS OF SPIRAL GALAXIES

Khasaeva T.T.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*E-mail: [justanyan@yandex.ru](mailto:justanyan@yandex.ru)*

УДК 550.34.01

## ЭПИЦЕНТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СИСТЕМЫ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ

Цветков И.А.<sup>1,2</sup>, Некрасова А.К.<sup>1</sup>, Кособоков В.Г.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики  
РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Российский технологический университет (МИРЭА), г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Международная организация по сейсмической безопасности (ISSO),  
г. Арсита, Италия

E-mail: [yaegorovichkrch@mail.ru](mailto:yaegorovichkrch@mail.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** Для четырех сейсмоактивных регионов Российской Федерации – Большой Кавказ, Алтай-Саяны, Прибайкалье, Камчатка и ее окружение – выполнено сравнение монофрактальных оценок  $D_0$  и  $D_2$  множества сосредоточения эпицентров с параметром  $C$  Общего закона подобия для землетрясений. Сравнение подтвердило высокую степень согласованности размерностей  $D_0$ ,  $D_2$  и параметра  $C$ . Дополнительно получены оценки  $D_0$  и  $D_2$  региональных систем активных разломов, представленных в базе данных «Активные разломы Евразии». Сравнение фрактальных оценок, полученных для эпицентров и систем активных разломов, выявило более высокие значения фрактальной размерности для региональных систем активных разломов.

**Ключевые слова:** активные разломы Евразии, Большой Кавказ, Алтай-Саяны, Прибайкалье, Камчатка, Общий закон подобия для землетрясений, фрактальная размерность

Представление о литосфере Земли как о сложной, нелинейной, самоподобной, иерархически самоорганизованной системе мобильных блоков разного размера [Keilis-Borok, 1990] является базовым фактором для современных исследований сейсмологии. Исходя из иерархической структуры разломов и блоков, независимо несколькими исследователями был сделан вывод о том, что пространственные, временные и энергетические характеристики сейсмичности подчиняются единому закону подобия, обобщающему соотношение Гутенберга – Рихтера [Kosobokov, Mazhkenov, 1988; Челидзе, 1990; Смирнов, 1995]. Общий закон подобия для землетрясений (ОЗПЗ) сформулирован в работах [Kosobokov, Mazhkenov, 1988; Кейлис-Борок и др., 1989] в виде:

$$\log_{10} N(M, L) = A + B \times (5 - M) + C \times \log_{10} L, M_- \leq M \leq M^+$$

где коэффициенты  $A$  и  $B$  имеют тот же смысл, что и коэффициенты  $a$  и  $b$  в законе повторяемости Гутенберга – Рихтера, а коэффициент  $C$  соответствует фрактальной размерности множества сосредоточения эпицентров.

Для четырех сейсмоактивных регионов Российской Федерации – Большой Кавказ, Алтай-Саяны, Прибайкалье, Камчатка и ее окружение – ранее получены региональные оценки коэффициентов ОЗПЗ [Kosobokov, Nekrasova, 2018a; 2018b; Nekrasova, Kosobokov, 2023a; 2023b]. Пространственные распределения коэффициента  $C$  в выбранных регионах

показаны на верхних панелях рис. 1, а на нижних – распределения плотности вероятности значений регионального коэффициента  $C$  для этих регионов. Результаты сравнения монофрактальных – «блочной»,  $D_0$ , и корреляционной,  $D_2$ , – размерностей, полученных для эпицентров четырех регионов, с региональными оценками коэффициента  $C$  представлены в настоящей работе.

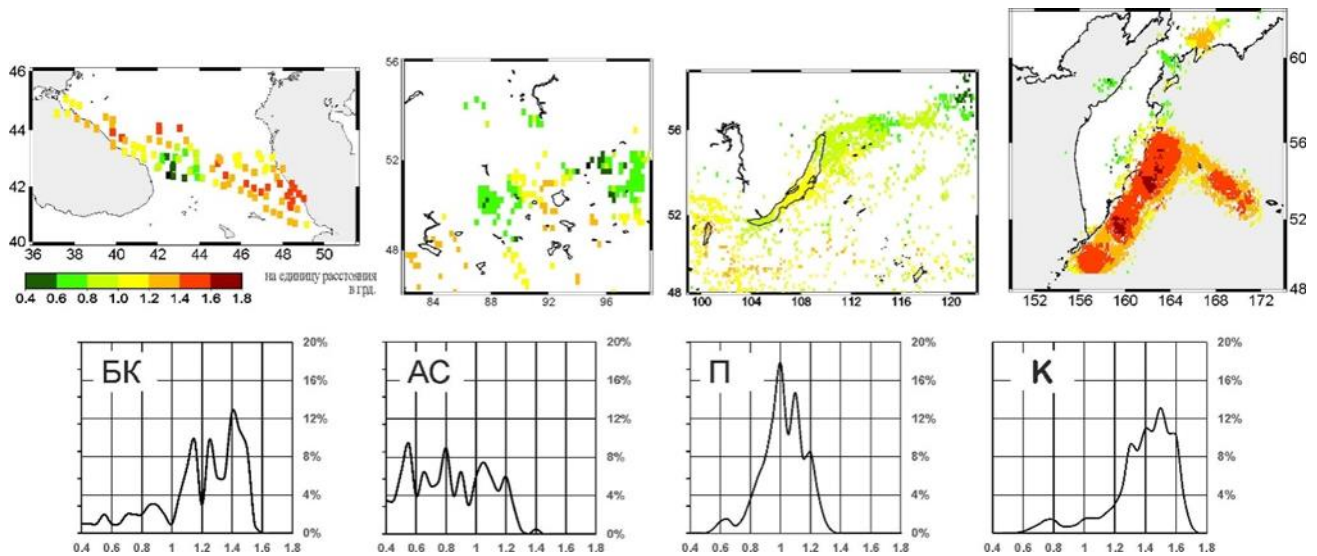


Рис. 1. Региональное пространственное распределение фрактальной размерности множества сосредоточения эпицентров, коэффициент  $C$ , ОЗПЗ (вверху) и распределение плотности вероятности региональных значений коэффициента  $C$  (внизу)

Расчеты значений монофрактальной размерности выполнены программой [Vuidel *et al.*, 2021]. Для каждой ячейки с линейным размером  $l_i$  и числа точек  $N_i$ , подсчитанных в данной ячейке, строится зависимость  $(l_i, N_i)$  в логарифмических осях. Построенный график аппроксимируется линейной регрессией. Угол наклона полученной прямой соответствует фрактальной размерности  $D$ :  $\log N = \log l^D = D \log l$ . «Блочная» размерность  $D_0$  рассчитана для ячеек квадратной сетки. На каждом шаге итерации длина стороны ячейки  $l_i$  увеличивается вдвое. Для каждой итерации определяется количество ячеек  $N_i$ , содержащих хотя бы одну точку; корреляционная размерность  $D_2$  определена как наклон графика для случая, когда  $N_i$  – среднее число точек в ячейке размера  $l$ .

В табл. 1 приведены значения  $D_0$  и  $D_2$ , максимальные значения и значения 95% доверительного интервала плотности вероятности распределения региональных значений коэффициента  $C$ . Отметим, что для всех четырех регионов оценки  $D_0$  и  $D_2$  находятся в 95% доверительном интервале значений параметра  $C$ .

Таблица 1. Региональные оценки фрактальной размерности множества сосредоточения эпицентров

Регион	с.ш., °	в.д., °	макс. $l$ , °	мин. $l$ , °	$N$	$D_0$ , $R^2$ (%)	$D_2$ , $R^2$ (%)	$C$ (ОЗПЗ)	
								макс.	95% дов. инт
Большой Кавказ	40–46	36–51.5	2	1/4	16537	1.42 (99.9)	1.02 (99.2)	1.4	0.70–1.55
Алтай-Саяны	48–56	82–100	4	1/4	4740	1.32 (99.1)	0.56 (97.7)	0.6, 0.8	0.40–1.20
Прибайкалье	48–58	99–122	2	1/8	8130	1.17 (99.1)	0.88 (99.6)	1.0	0.75–1.25
Камчатка	46–58	150–174	2	1/4	49535	1.48 (>99.9)	1.64 (>99.9)	1.5	1.15–1.70

Дополнительно получены оценки значений монофрактальных размерностей  $D_0$  и  $D_2$  для систем активных разломов (АР) в пределах рассмотренных четырех регионов. Значения  $D_0$  и  $D_2$  получены для АР, в окрестности которых были зафиксированы сейсмические события, представленные в региональных каталогах. Значения  $D_0$  и  $D_2$  получены как для всего набора АР, так и для подсистем АР, определенных по типам основных современных вертикальных и латеральных движений. Рассмотренные системы АР представлены на рис. 2. Полученные оценки монофрактальных размерностей для систем АР приведены в табл. 2.

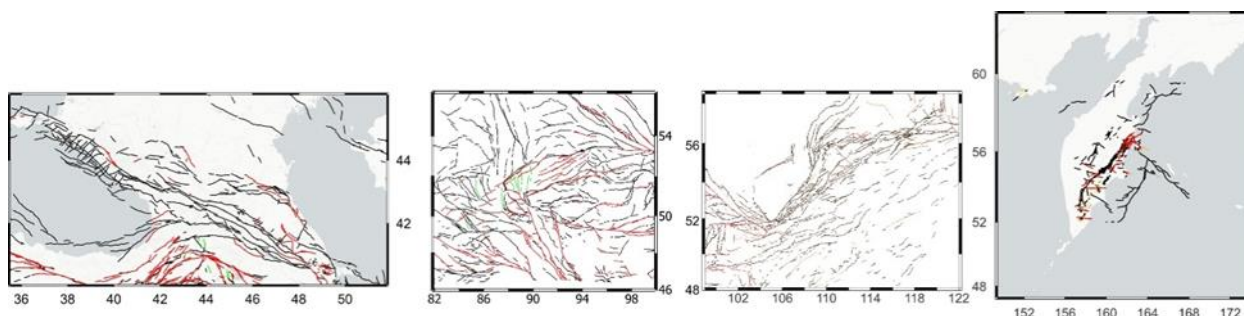


Рис. 2. Региональные системы активных разломов: Большой Кавказ, Алтай-Саяны, Прибайкалье, Камчатка и ее окрестности [Bachmanov et al., 2017]. Черные линии – вертикальные движения, красные линии – латеральные движения, зеленые линии – движения растяжения

На рис. 3 представлены значения фрактальных размерностей  $D_0$  и  $D_2$  региональных систем АР, связанных с зарегистрированными землетрясениями, для Большого Кавказа, региона Алтай-Саяны, Прибайкалья и Камчатки. Третий столбик в каждой из трех категорий АР соответствует наибольшему значению параметра  $C$  ОЗПЗ. Регион Алтай-Саяны характеризуется двумя максимумами коэффициента  $C$ . Вертикальный маркер соответствует значениям в пределах 95% доверительного интервала.

Анализируя рис. 3, табл. 1 и табл. 2, видим, что значения параметра  $C$  и размерностей  $D_0$  и  $D_2$  расходятся в каждом из четырех регионов. Для Большого Кавказа, региона Алтай-Саяны и Прибайкалья фрактальная размерность АР имеет большие значения по сравнению с фрактальной размерностью эпицентров землетрясений. Напротив, для систем АР Камчатки и ее окрестностей фрактальная размерность эпицентров землетрясений превосходит оценки  $D_0$  и  $D_2$ .

Таблица 2. Монофрактальные размерности  $D_0$  и  $D_2$  региональных систем активных разломов

Регион	с.ш., °	в.д., °	макс. $l$ , °	мин. $l$ , °	$D_0$ (число точек)			$D_2$		
					все	лат.	верт.	все	лат.	верт.
Большой Кавказ	40–46	36–51.5	2	1/4	1.33 (1353)	0.88 (167)	1.36 (1023)	1.59	1.03	1.50
Алтай-Саяны	48–56	82–100	4	1/4	1.47 (2947)	1.18 (1063)	1.35 (1682)	1.50	1.20	1.38
Прибайкалье	48–58	99–122	2	1/8	1.22 (2144)	0.88 (308)	1.13 (1688)	1.48	1.08	1.47
Камчатка	46–58	150–174	2	1/4	1.14 (1282)	0.91 (176)	1.06 (896)	1.37	1.28	1.30

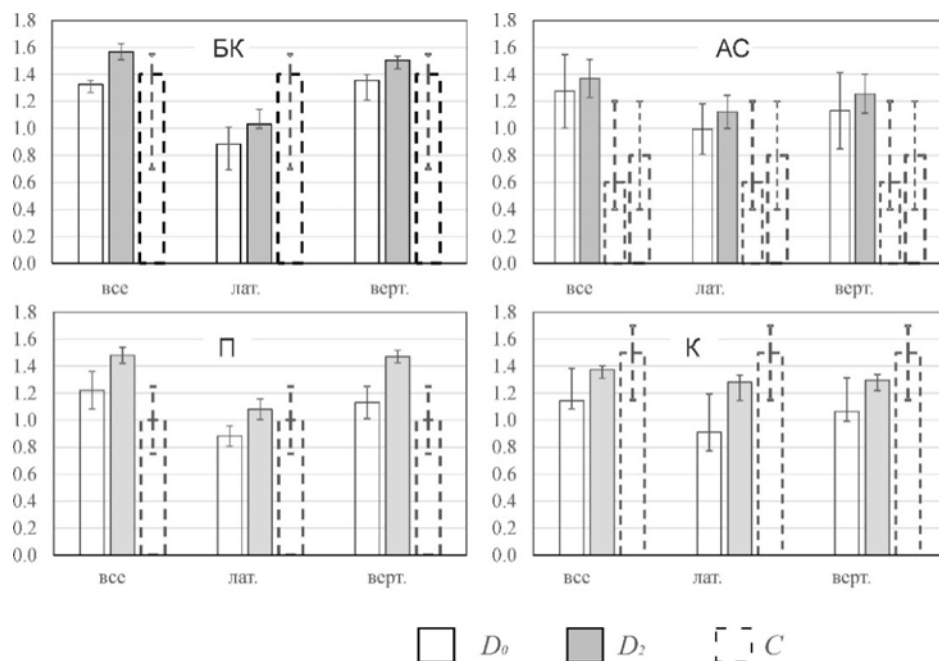


Рис. 3. Фрактальные размеры региональных систем активных разломов и региональные значения параметра  $C$  ОЗПЗ. Гистограммы оценок  $D_0$ ,  $D_2$  и  $C$  приведены с маркерами 95% доверительного интервала

Представленный анализ позволяет сделать следующие предварительные выводы, которые требуют дальнейшего обсуждения и интерпретации:

- с сейсмологической точки зрения региональные системы АР, связанные с актуальной сейсмической активностью, отражают очевидную тектоническую фрагментацию литосферы со значительной избыточностью;

- повышенные значения фрактальной размерности систем региональных АР по сравнению с фрактальной размерностью эпицентров землетрясений свидетельствуют о преобладании запертых, спящих и неактивных разломов.

Важно подчеркнуть, что региональные оценки коэффициента  $C$  ОЗПЗ и монофрактальные размерности систем АР не обнаруживают заметной корреляции, однако наблюдаются очевидные корреляции параметра  $C$  и монофрактальных размерностей множества эпицентров.



Эти выводы в совокупности дают важные представления о сложной природе тектонических систем АР и их взаимосвязи с сейсмодинамикой.

### Литература

- Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г., Мажкенов С.А. О подобии в пространственном распределении сейсмичности. Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных // Вычислительная сейсмология. Вып. 22. М.: Наука, 1989. С. 28–40.
- Смирнов В.Б. Повторяемость землетрясений и параметры сейсмического режима // Вулканология и сейсмология. 1995. № 3. С. 59–70.
- Челидзе Т.Л. Обобщенный фрактальный закон сейсмичности // Доклады АН СССР. 1990. Т. 314. № 5. С. 1104–1105.
- Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G. The Active Faults of Eurasia Database // Geodynamics and Tectonophysics. 2017. V. 8. No 4. P. 711–736. DOI:[10.5800/GT-2017-8-4-0314](https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314)
- Keilis-Borok V.I. The lithosphere of the Earth as a non-linear system with implications for earthquake prediction // Review of Geophysics. 1990. V. 28. No 1. P. 19–34.
- Kossobokov V., Mazhkenov S. Spatial characteristics of similarity for earthquake sequences: fractality of seismicity // Lecture notes of the workshop on global geophysical informatics with applications to research in earthquake prediction and reduction of seismic risk (15 Nov. 16 Dec., 1988). ICTP, Trieste, 1988. 15 pp.
- Kossobokov V., Nekrasova A. Earthquake Hazard and Risk Assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: Greater Caucasus and Crimea // Journal of Seismology. 2018a. V. 22. P. 1157–1169. DOI:[10.1007/s10950-018-9759-4](https://doi.org/10.1007/s10950-018-9759-4)
- Kossobokov V., Nekrasova A. Earthquake Hazard and Risk Assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: Altai-Sayan Region // Natural Hazards. 2018b. V. 93. No 3. P. 1435–1449. DOI:[10.1007/s11069-018-3359-z](https://doi.org/10.1007/s11069-018-3359-z)
- Nekrasova A., Kossobokov V. Seismic risk assessment for the infrastructure in the regions adjacent to the Russian Federation Baikal–Amur Mainline based on the Unified Scaling Law for Earthquakes // Natural Hazards. 2023a. V. 116. No 2. P. 1995–2010. DOI:[10.1007/s11069-022-05750-9](https://doi.org/10.1007/s11069-022-05750-9)
- Nekrasova A., Kossobokov V. The observed variability of seismic dynamics in the Pacific Northwest, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023). 2023b. DOI:[10.57757/IUGG23-0382](https://doi.org/10.57757/IUGG23-0382)
- Vuidel G., Tannier C., Frankhauser P. Fractalyse 3.0 (Fracgis) source code (Version 3.0-0.9.1). 2021.

## EARTHQUAKE EPICENTRES AND ACTIVE FAULT SYSTEMS

Tsvetkov I.A.<sup>1,2</sup>, Nekrasova A.K.<sup>1</sup>, Kossobokov V.G.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia

<sup>2</sup> Russian Technological University (MIREA), Moscow, Russia

<sup>3</sup> International Seismic Safety Organisation (ISSO), Arsita, Italy

E-mail: [yaegorovichkrch@mail.ru](mailto:yaegorovichkrch@mail.ru)

УДК 550.34.03:535.36

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПТОВОЛОКОННЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ МЕЖСКВАЖИННОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ

Чугаев А.В.<sup>1</sup>, Симикин Д.Е.<sup>2</sup>, Тезиков А.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

<sup>2</sup>ООО «ПетроФайбер», г. Новомосковск, Россия

E-mail: [chugaev@mi-perm.ru](mailto:chugaev@mi-perm.ru)

(устный доклад)

**Аннотация.** На основании сравнения энергий акустического сигнала и шума выполнена оценка количественной чувствительности распределенных оптоволоконных датчиков. В качестве референсного сенсора использованы скважинные гидрофоны. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем регистрации сейсмоакустического сигнала на основе оптоволоконных распределенных датчиков.

**Ключевые слова:** сейсмический датчик, распределенный оптоволоконный датчик, межскважинное просвечивание, сейсмическая запись, сейсмоакустика

На Верхнекамском месторождении солей реализована система мониторинга аварийного участка, состоящая из распределенной оптоволоконной системы регистрации акустических колебаний в четырех скважинах и активных скважинных электроискровых источников упругих колебаний [Чугаев, Кузнецов, 2023]. Мониторинг выполняется способом межскважинного акустического просвечивания. Регистрация выполняется с помощью специального кабеля, содержащего прямое и спиральное волокно. Оценка упругих свойств массива выполняется на основании сравнения волновых полей прямых, головных и отраженных волн, в результате локализуются участки изменения упругих свойств массива и дается количественная оценка таких изменений. Использование большого количества одновременно регистрирующих каналов обуславливает экономическую эффективность данного аппаратного решения по сравнению с традиционными гидрофонными датчиками. В данной работе сделана попытка количественно оценить соотношение чувствительности традиционных сейсмических датчиков и оптоволоконной системы регистрации.

Регистрация оптоволоконной системой выполнена регистратором ВОСК-А производства компании ООО «ПетроФайбер» [Alekseev et al., 2014] в трех вариантах базы приема (Gauge Length): 5, 7.5, 10 м. В каждом варианте оценивались характеристики волновой картины как с прямого, так и со спирального волокна. В той же паре скважин выполнена съемка с помощью традиционных гидрофонных пьезокерамических датчиков, чувствительность которых составляет –197 дБ относительно 1 В на 1 мкПа, с последующим усилением сигнала на 6 дБ до передачи на поверхность.

Межскважинное просвечивание выполнено с полным лучевым покрытием в целевом интервале глубин. Параметры системы наблюдения для гидрофонов и оптоволоконной системы регистрации приведены в таблице. Сейсмограммы прямого параллельного просвечивания, зарегистрированные гидрофонами, прямым и спиральным волокном, представлены на рис. 1. Частотный состав регистрируемого полезного сигнала находится в пределах 100–700 Гц.

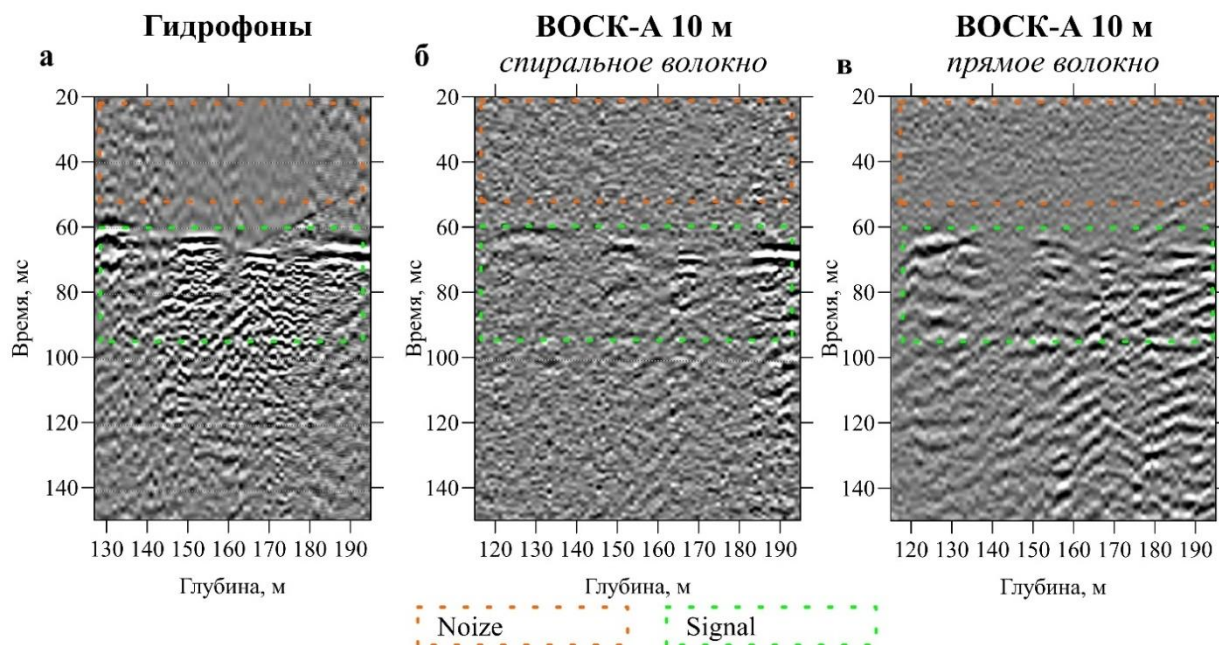


Рис. 1. Сейсмограммы параллельного просвечивания, зарегистрированные гидрофонами (а) и оптоволоконной системой БОСК-А со спиральным (б) и прямым (в) волокном

Таблица. Параметры системы наблюдения

	Гидрофоны	БОСК-А	
Тип волокна	-	Прямое	Спиральное
Шаг пунктов приема, м	1	1	0.75
Длина записи, мс	300		
Шаг дискретизации по времени, мс	0.2		
Интервал возбуждения, м	115–195		
Интервал приема, м	127–198	100–198	
Количество накоплений	4	16	
Количество пунктов приема для одного физического пункта возбуждения	24	3002	
Общее количество трасс в наборе, ед	5832	8019	10500

По каждому набору данных для всех трасс рассчитана энергия шума  $N$ , определяемая как сумма квадратов амплитуд в интервале времени 40 мс до первых вступлений, и энергия полезного сигнала  $S$  в интервале 40 мс начиная со времени первых вступлений (рис. 2). Структура шума для двух типов датчиков отличается. Гидрофоны регистрируют

низкочастотный шум в интервале глубин выше 150 м, в то время как для оптоволоконных датчиков шум в целом равномерно распределен по всему интервалу приема. Очевидно, это связано с разными физическими принципами регистрации. Гидрофоны регистрируют изменение всестороннего давления в жидкой среде, в то время как оптоволоконные датчики реагируют на изменение длины волокна.

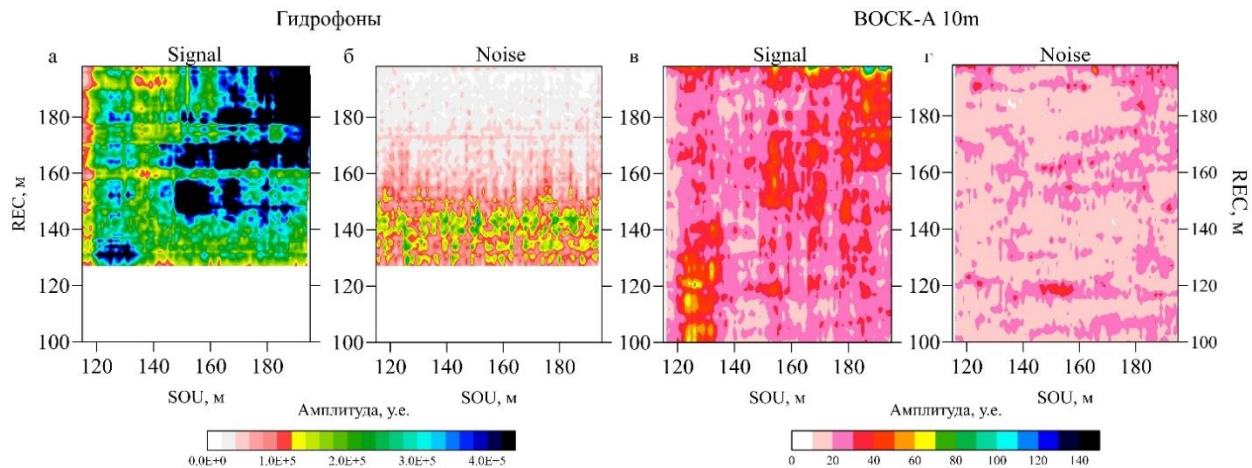


Рис. 2. Распределения сигнала (а, в) и шума (б, г) гидрофонов (а, б) и оптоволоконных датчиков (в, г). REC – глубина приемника, SOU – глубина источника

Следующим шагом выполнен расчет отношения сигнал – шум  $R = (S-N)/N$  по всем наборам данных. Распределения  $R$  от глубины источника и приемника для каждого набора данных приведены на рис. 3. Для спирального волокна энергия сигнала ожидаемо меньше, поскольку чувствительность распределяется по трем пространственным осям, однако, как видно из рис. 1, первые вступления прямой волны, падающей под прямым углом, имеют большую амплитуду, чем для прямого волокна, что хорошо согласуется с теоретическим представлением о диаграммах направленности кабеля с прямым и спиральным волокном [Kuvshinov, 2016; Чугаев, Тарантин, 2023]. Отношение  $R$  гидрофонов растет с глубиной, что связано с уменьшением микросейсмического шума на более глубоких участках записи.

Чтобы сравнить значения параметра  $R$ , для различных наборов данных вычислены отношения  $R_{FO}/R_H$ , где  $R_{FO}$  и  $R_H$  – значения отношений сигнал – шум соответственно оптоволоконной системы регистрации (FO–fiber optic) и гидрофонов (H). Такие отношения были рассчитаны для трех выборок, ограниченных интервалами приема: 127–200 м, 150–200 м и 175–200 м исходя из соображений, что с глубиной уровень акустического шума в скважине уменьшается, однако уменьшается и величина выборки. При расчете учтено влияние количества накоплений на одном пункте возбуждения на значение  $R$  для разных наборов. В качестве результата выбраны медианные значения полученных наборов отношений (рис. 4).

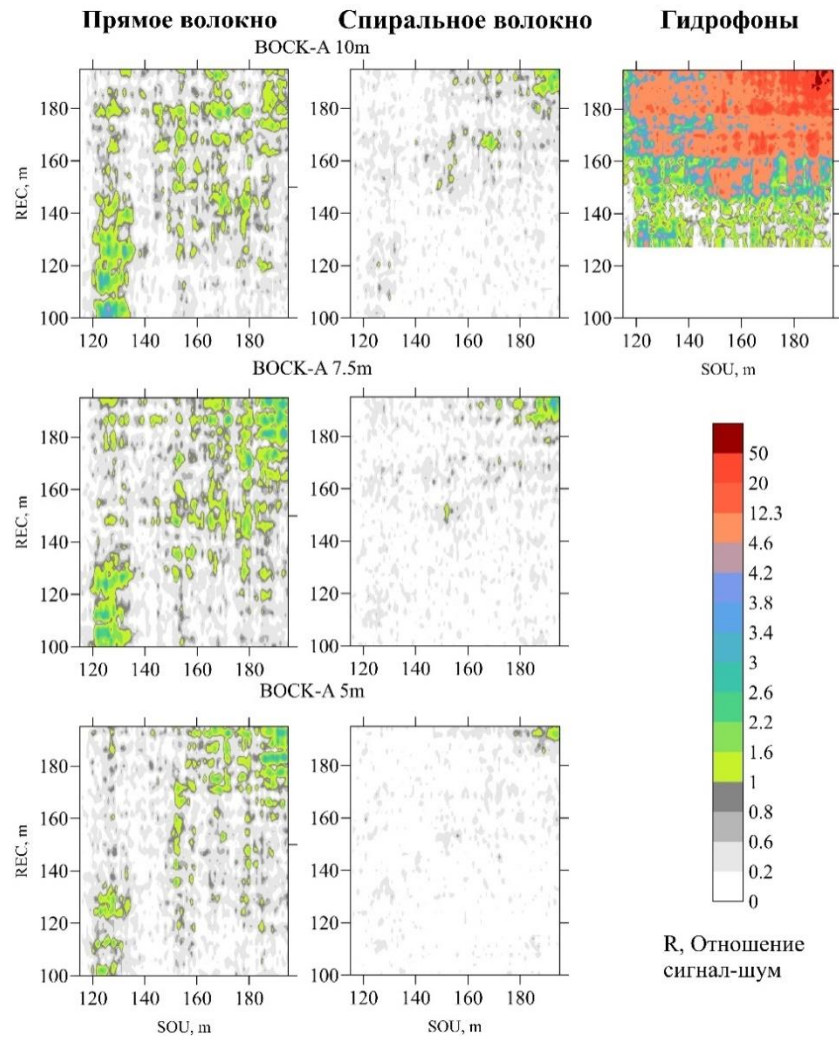


Рис. 3. Распределения отношения сигнал-шум от глубины источника и приемника для оптоволоконной системы регистрации и гидрофонов

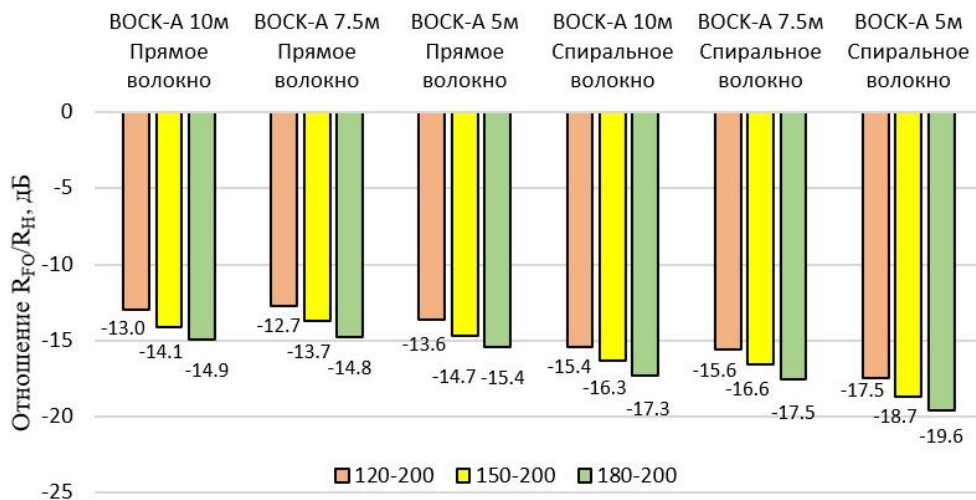


Рис. 4. Сравнение энергий оптоволоконной системы регистрации и гидрофонов при различной базе приема и интервале глубин

На гистограммах прослеживается уменьшение относительной чувствительности оптоволоконных датчиков с увеличением глубины и снижением акустического шума. По всей видимости, это связано с составом регистрируемого шума гидрофонными и опто-

волоконными датчиками. Гидрофоны регистрируют только микросейсмический шум, присутствующий в скважине, в то время как записи оптоволоконных датчиков дополнительно осложнены оптическим шумом. Соотношение уровня оптического и акустического шума в итоговом отношении влияет на значение  $R_{FO}/R_H$ , уменьшая его вместе с уменьшением акустического шума.

Как для прямого, так и для спирального волокна наблюдается нелинейная зависимость чувствительности с уменьшением базы приема. По всей видимости, это связано с нелинейным амплитудно-частотным откликом оптоволоконных датчиков.

Полученные результаты дают возможность количественно оценить чувствительность оптоволоконных систем регистрации, что существенно при проектировании сейсмоакустических систем наблюдения на их основе. Для прямого волокна чувствительность на 13–14 дБ меньше, чем у гидрофонов, а у спирального – на 16–17 дБ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер проекта 122012000401-7).*

### **Литература**

- Чугаев А.В., Кузнецов А.И. Оценка возможностей распределенной оптоволоконной системы регистрации со спиральным кабелем для проведения межскважинного сейсмоакустического просвечивания // Приборы и техника эксперимента. 2023. № 5. С. 167–173.
- Чугаев А.В., Тарантин М.В. Амплитудно-частотный отклик распределенного акустического сенсора DAS со спиральной намоткой волокна // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 1. С. 13–21. DOI:[10.17073/2500-0632-2022-06-10](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-06-10)
- Alekseev A.E., Vdovenko V.S., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Simikin D.E. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse phase modulated probe signal // Laser Physics. 2014. V. 24. No 11. Article 115106. DOI:[10.1088/1054-660X/24/11/115106](https://doi.org/10.1088/1054-660X/24/11/115106)
- Kuvshinov B.N. Interaction of helically wound fibre-optic cables with plane seismic waves: Interaction of fibre-optic cables // Geophysical Prospecting. 2016. V. 64. No 3. P. 671–88. DOI:[10.1111/1365-2478.12303](https://doi.org/10.1111/1365-2478.12303)

## **QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE SENSITIVITY OF FIBER-OPTIC DISTRIBUTED SENSORS BASED ON CROSS-WELLSURVEY DATA**

**Chugaev A.V.<sup>1</sup>, Simikin D.E.<sup>2</sup>, Tezиков A.D.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Mining Institute, UB, RAS, Perm, Russia*

<sup>2</sup>*Petrofiber, LLC, Novomoskovsk, Russia*

*E-mail: [chugaev@mi-perm.ru](mailto:chugaev@mi-perm.ru)*

УДК 550.34

## ОТРАЖЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В ПОЛЕ ОБЪЁМНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВЕННОГО РАДОНА В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Юрков А.К., Козлова И.А., Бирюлин С.В.

*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрОРАН, г. Екатеринбург,  
Россия*

*E-mail: [akyukov@mail.ru](mailto:akyukov@mail.ru)*

(устный доклад)

**Аннотация.** Приведены результаты наблюдений объемной активности радона (ОАР) при подготовке близких и далеких от точки наблюдения землетрясений. Показано, что, как и для зоны субдукции, близкие и дальние события отражаются на разных участках кривой ОАР для геодинамических условий Тянь-Шаня, Кавказа, Урала, Крыма. Установлено, что дальние события происходят после максимума кривой ОАР в интервале до 5–6 суток. Близкие события происходят, начиная от завершения аномалии, в интервале до 28 суток.

**Ключевые слова:** предвестники, краткосрочный прогноз, изотопы радона, температура, субдукция, ближняя зона, адвекция, горный удар

2023 год отметился пока тремя катастрофическими землетрясениями: Турция, Марокко, Афганистан. И, как мы видим по содержанию публикаций, прогноз сейсмических событий остался на прежнем уровне. Можно говорить только о двух успешных прогнозах: Хайченское (КНР) и Лакуиле (Италия) [Fengming, Ge, 1975; Giuliani et al., 2009]. Наиболее реальным физическим механизмом при реализации прогноза является наблюдение за изменением напряженно-деформированного состояния горных пород. Эти изменения, приводящие в конечном счете к землетрясению, вызывают вариации в подземной гидросфере, атмосфере и трещинообразование. Изменения в гидросфере приводят к движению жидкости по стволу скважин, которые иногда вызывают изменения ее уровня. Более надежный вариант наблюдения за изменениями гидросферы – это измерение движения жидкости по стволу скважины по разработанной в Институте геофизики методике температурных измерений. По этим измерениям было спрогнозировано время за 2 (4) дня землетрясения «Тохоку». В настоящее время метод прогнозирования землетрясений на основе температурных измерений активно развивается в КНР. В Институте геофизики основное внимание уделили простым в реализации измерениям объемной активности почвенного радона (ОАР). Эти исследования начались в 1989 году по инициативе Ю.П. Булашевича при изучении горных ударов и были продолжены В.И. Уткиным. Ими были сформулированы и опробованы основные положения методики, включая адвективный режим доставки радона к детектору, используемой в настоящее время при прогнозе тектонических событий. При изучении горных ударов стало понятно, что лабораторные исследования разрушения образцов горных пород важны для понимания процессов,

происходящих в очаге землетрясения, но при реальном прогнозе все наблюдения ведутся вблизи земной поверхности. Это подтверждается экспериментальными наблюдениями при изучении горных ударов. Так, при измерениях ОАР в горной выработке на шахте № 15 Североуральского бокситового рудника в один из дней наблюдатели вместе с работающей аппаратурой оказались в очаге горного удара (рис. 1) [Патент..., 1997].

Аппаратура зафиксировала трехкратное уменьшение ОАР за 55 минут до горного удара, после него ОАР вернулась к первоначальным значениям. То есть увеличения ОАР не произошло, хотя стенки и потолок выработки были разрушены, а шпур, в котором производились измерения, находился всего лишь в 3 метрах от стенки выработки. Сжатие горных пород, вызвавшее подготовку горного удара, привело к уменьшению величины ОАР. После горного удара горные породы, как и величина ОАР, вернулись в исходное состояние [Булашевич и др., 1996]. Мы считаем это очень важным – для наблюдений в подземной атмосфере пригодны только изотопы радона. Они имеют достоверный и непрерывный источник генерации, и у них отсутствует накопительный эффект. Все другие компоненты подземной атмосферы этим критериям не соответствуют и могут давать неоднозначные результаты.

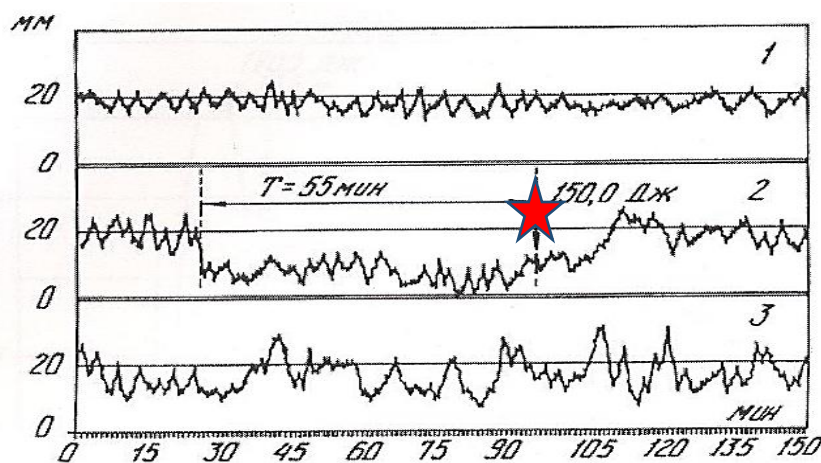


Рис. 1. Фрагмент записи ОАР в горной выработке (значения приведены в мм./сек). 1 – при измерениях в неработающей шахте; 2 – при подготовке горного удара, звездой обозначен момент горного удара; 3 – при измерениях в работающей шахте [Патент..., 1997]

В 2006 году с помощью Института морской геологии и геофизики ДВО РАН удалось организовать наблюдения ОАР и температуры на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп и получить длительные непрерывные ряды наблюдений. В результате обработки с 2011 по 2018 (2023) год (в этот период измерения проводились одним прибором) было установлено, что события разной удаленности отражаются на разных участках кривой изменения ОАР. Землетрясения не отражаются на восходящей ветви. В зависимости от расстояния от точки измерения до эпицентра события дальние события отмечаются, начиная от максимума ОАР



и на нисходящей ветви в интервале времени до 5–6 суток. Близкие события отмечаются, начиная от выхода аномалии на фоновые значения, в интервале времени до 28 суток. Для зоны субдукции радиус «ближней» зоны менее 130 километров, радиус «дальней» зоны более 180 километров (рис. 2) [Козлова и др., 2022].

При обработке результатов для выбора радиуса охвата событий использовалось отношение магнитуды к логарифму расстояния от точки наблюдения до эпицентра события (геодинамический критерий  $K$ ) больше 2.5, подтвержденный наблюдениями уровня жидкости в скважинах [King et al., 1996]. Статистически, по сравнению случайных выборок событий и аномалий и экспериментальных данных была обоснована причинно-следственная связь между землетрясениями и аномалиями ОАР [Юрков и др., 2023а].

Радиусы ближней и дальней зон были определены для зоны субдукции. Следующая задача состоит в определении размеров зон в других геодинамических условиях. Сделать это на сегодняшний момент достаточно сложно, так как количество происходящих сейсмических событий в других регионах (где есть возможность организовать наблюдения) недостаточно для получения надежных величин.

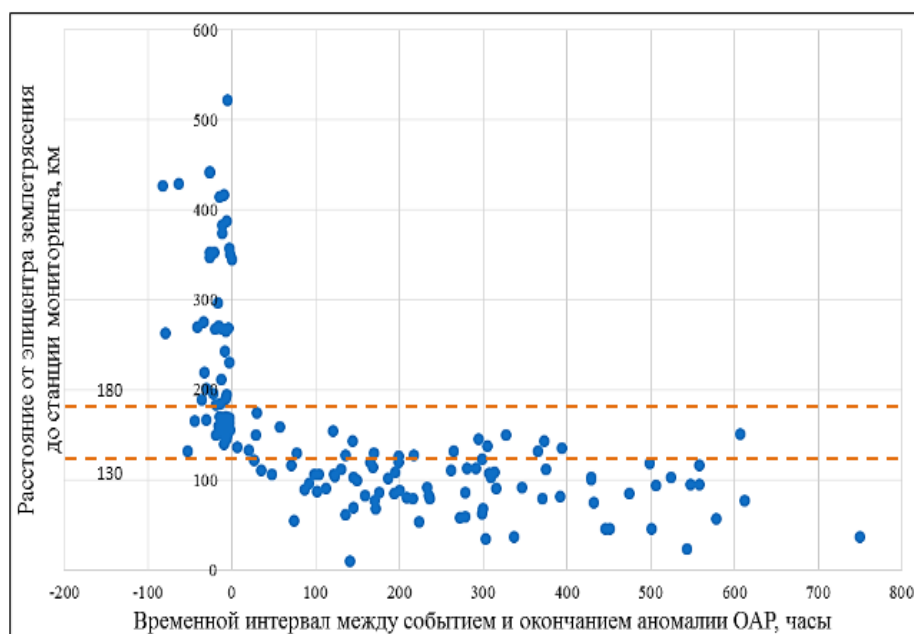


Рис. 2. Зависимость расстояния от эпицентра землетрясения до точки наблюдения от интервала времени между окончанием соответствующей аномалии ОАР и событием

В результате наблюдений на Северном Кавказе установлено, что поведение кривой ОАР перед землетрясением ближней зоны 06.11.2018  $K = 2.61$  не противоречит закономерностям, установленным для Южно-Курильского региона (рис. 3) [Заалишвили и др., 2022].

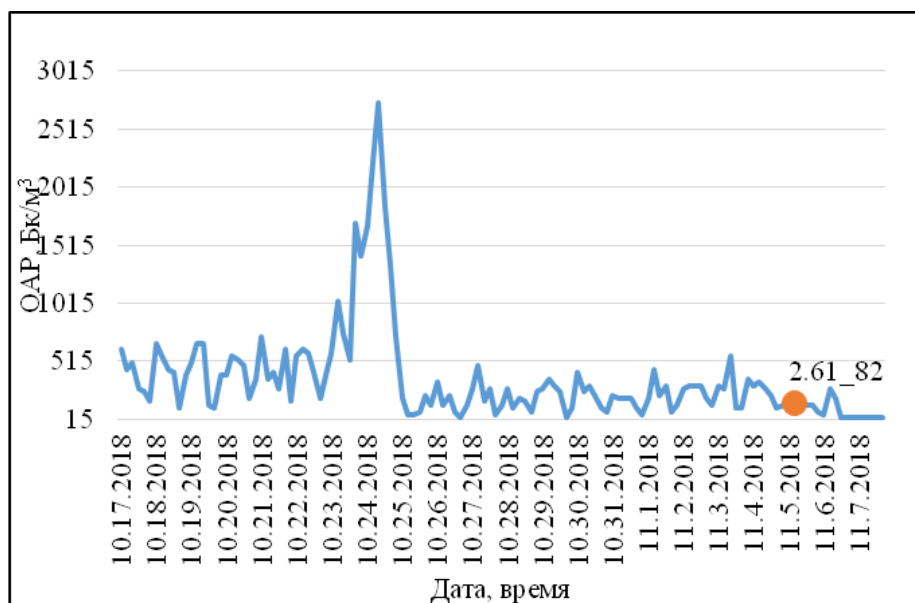


Рис. 3. Станция «Кармадон». Наблюдаемые значения объёмной активности радона (ОАР) и произошедшее землетрясение (показано точкой). Подписи точки: первое число – отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от эпицентра до станции мониторинга; второе число – расстояние от эпицентра до станции мониторинга

Интерпретация данных 2001–2003 гг. по Северному Тянь-Шаню также показала наличие ближней и дальней зон. Аномалии радона-222, в силу методических особенностей применения сейсмической радоновой, слабоконтрастные, в отличие от радона-219 (торон). Поэтому поведение кривой радона-219 более показательно [Юрков и др., 2023а].

Для Урала характерна слабая сейсмичность и возможность наблюдения процесса подготовки землетрясений крайне низкая, тем не менее афтершоки Катав-Ивановского землетрясения 2018 года хорошо проявились в ОАР и укладываются в указанные закономерности для ближней зоны [Юрков и др., 2023б]. В 2023 году мы получили подтверждение наличия дальней зоны по наблюдениям на станции «Коуровка» (рис. 4). События 2–3 апреля отразились в кривой ОАР как дальние.

22 июня 2023 года произошло в Крыму землетрясение магнитудой 4.6 в 59 км от Севастополя. Станция Института геофизики в Демьяновке еще не работала, но работала прогностическая сеть Крымского Республиканского центра сейсмической и оползневой опасности (ГАУ «КРЦ» Крым). Руководство центра разрешило использовать их данные по вариациям ОАР в докладе. Фрагмент записи кривой ОАР, полученной в диффузионном режиме, на станциях «Суворово» и «Лазурное» приведен на рис. 5. Приведенные результаты не противоречат установленным соотношениям.

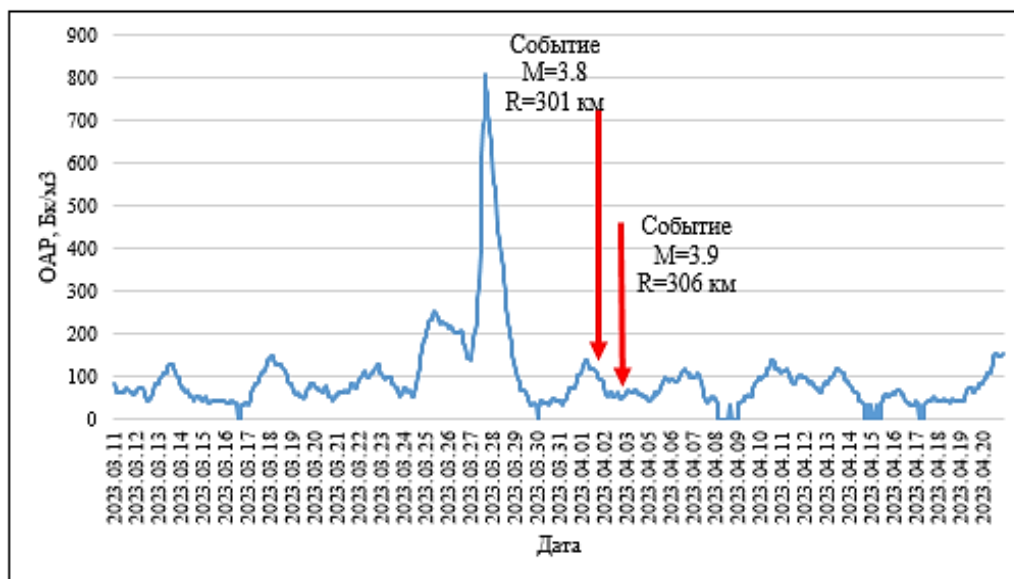


Рис. 4. Фрагмент записи вариаций объемной активности радона (ОАР) на станции «Коуровка»

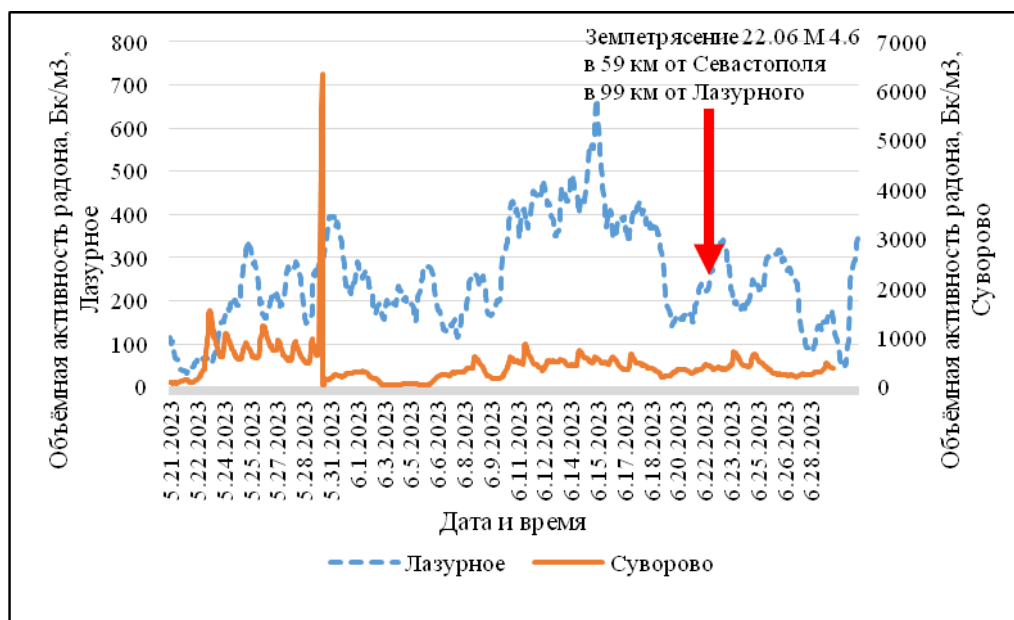


Рис. 5. Фрагмент записи вариаций объемной активности радона (ОАР) на станциях «Суворово» и «Лазурное», данные представлены ГАУ «КРЦ» Крым

Приведенные результаты наблюдений ОАР при подготовке землетрясений показывают, что для Тянь-Шаня, Кавказа, Урала и Крыма далекие и близкие события отмечаются на разных участках кривой аномалии ОАР. Недостаточное количество зарегистрированных землетрясений не позволяет выполнить количественные оценки радиусов зон для них.

### Литература

Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К., Николаев В.Н. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // Доклады РАН. 1996. Т. 345. № 2. С. 245–248.

- Заалишвили В.Б., Бирюлин С.В., Козлова И.А., Мельков Д.А., Юрков А.К. Закономерности проявления аномалий объёмной активности радона перед землетрясениями в различных сейсмоактивных регионах // Геология и геофизика Юга России. 2022. Т. 12. № 1. С. 35–50. DOI:[10.46698/VNC.2022.53.28.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.53.28.003)
- Козлова И.А., Юрков А.К., Бирюлин С.В. Вариации объёмной активности радона при техногенных и тектонических сейсмических событиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 5–1. С. 119–130.
- Патент РФ №2094831. Способ динамического проявления горного давления. 1997.
- Юрков А.К., Козлова И.А., Бирюлин С.В. Применение изотопов радона для изучения вариаций напряженно-деформированного состояния горных пород при прогнозе землетрясений // Вестник Краунц. 2023а. № 2. С. 81–89.
- Юрков А.К., Козлова И.А., Бирюлин С.В., Хацкевич Б.Д. Изменения геодинамической обстановки, проявившейся в вариациях почвенного радона, температуры и аномальных природных явлениях в зоне Катав-Ивановского землетрясения 05.09.2018 года на Южном Урале // Геоэкология. 2023б. № 3. С. 47–55.
- Fengming Z., Ge W. Prediction of the Haicheng earthquake and measures taken for disaster prevention. Seismological Bureau Liaoning Province, Liaoning, China, 18. 1975.
- Giuliani G.G., Giuliani R., Totani G., Eusani G., Totani F. Radon observations by gamma detectors PM-4 and PM-2 during the seismic period (January-April 2009) in L'Aquila Basin // Abstr. AGU Fall Meeting, December 14–18, San-Francisco 1. 2009. P. 3.
- King C.Y., King B.S., Evans W.S., Zhang W. Spatial radon anomalies on active faults in California // Applied Geochemistry. 1996. V. 11. P. 497–510. DOI:[10.1016/0883-2927\(96\)00003-0](https://doi.org/10.1016/0883-2927(96)00003-0)

## SEISMIC EVENTS REFLECTION IN THE FIELD OF VOLUME RADON ACTIVITY IN VARIOUS GEODYNAMIC CONDITIONS

Yurkov A.K., Kozlova I.A., Biryulin S.V.

*Institute of Geophysics Ural Branch, RAS, Ekaterinburg, Russia*

*E-mail: [akyurkov@gmail.com](mailto:akyurkov@gmail.com)*

UDC 528.855:550.34

## SYNOPTIC ANALYSIS OF CRUSTAL DEFORMATION WITH AN EYE ON MIGRATION OF THE STRONGEST EARTHQUAKES IN EASTERN ANATOLIA (TURKEY) 2009–2023

Dokukin P.<sup>1</sup>, Güvenaltın M.A.<sup>2</sup>, Kaftan V.<sup>3</sup>, Toker M.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> People's Friendship University of Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Hacettepe University, Ankara, Turkey

<sup>3</sup> Geophysical Center RAS, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Yuzuncu Yil University, Van, Turkey

E-mail: [v.kaftan@gcras.ru](mailto:v.kaftan@gcras.ru)

(oral)

**Abstract.** Synoptic animations of internal displacements and deformations of the earth's crust were obtained based on the results of continuous GNSS observations in Eastern Anatolia from 2009 to 2023. The spatiotemporal patterns of the seismic deformation process in connection with the tectonics of the region have been identified. It is shown that dilatation and total shear strains evolve in concert with the migration of the strongest earthquakes Elazığ, Elazığ-Malatya and Karamanmaraş. Two years before the occurrence of the devastating earthquakes of 2023, a deficit of internal displacements of GNSS stations developed in the area of their epicenters. The role of mantle flows in the seismic process is assessed.

**Key words:** GNSS, deformation, earthquake, displacement deficit

Permanently operating GNSS stations make it possible to track the evolution of modern movements and deformations of the earth's crust. In seismically active regions, these movements occur so quickly that they can be more confidently tracked at the level of accuracy of GNSS measurements. That is why a team of researchers from Russia and Turkey in 2021 focused their attention on the East Anatolian Fault zone. A GNSS network (TUSAGA-Aktif) has been operating and covering all of Turkey since 2009. We observed near-event stations of this network during which a series of destructive earthquakes occurred. The strongest of these events were the earthquakes Elazığ (2010.03.08,  $M_w = 6.1$ ) and Elazığ, Malatya (2020.01.24,  $M_w = 6.7$ ). Upon completion of the planned work plan, in 2023 destructive earthquakes occurred near the cities of Gaziantep (2023.02.06,  $M_w = 7.8$ ) and Kahramanmaraş (2023.02.06,  $M_w = 7.5$ ). Therefore, research was continued.

Based on GNSS measurements, spatiotemporal models of the evolution of movements and deformations of the earth's crust were obtained, which are video animations of the seismic deformation process [Dokukin *et al.*, 2023; Kaftan *et al.*, 2023a; 2023b; 2023c]. Synoptic analysis of the evolution of the process showed the following most important features.

The key tectonic element in the region is the Karliova Triple Junction (KTJ), from which the migration of the strongest seismic events to the SW began. The strong compression accumulated to the west of the KTJ stimulated the spread of intense extensions up to the sites of the destructive earthquakes of February 2023 (Fig. 1).

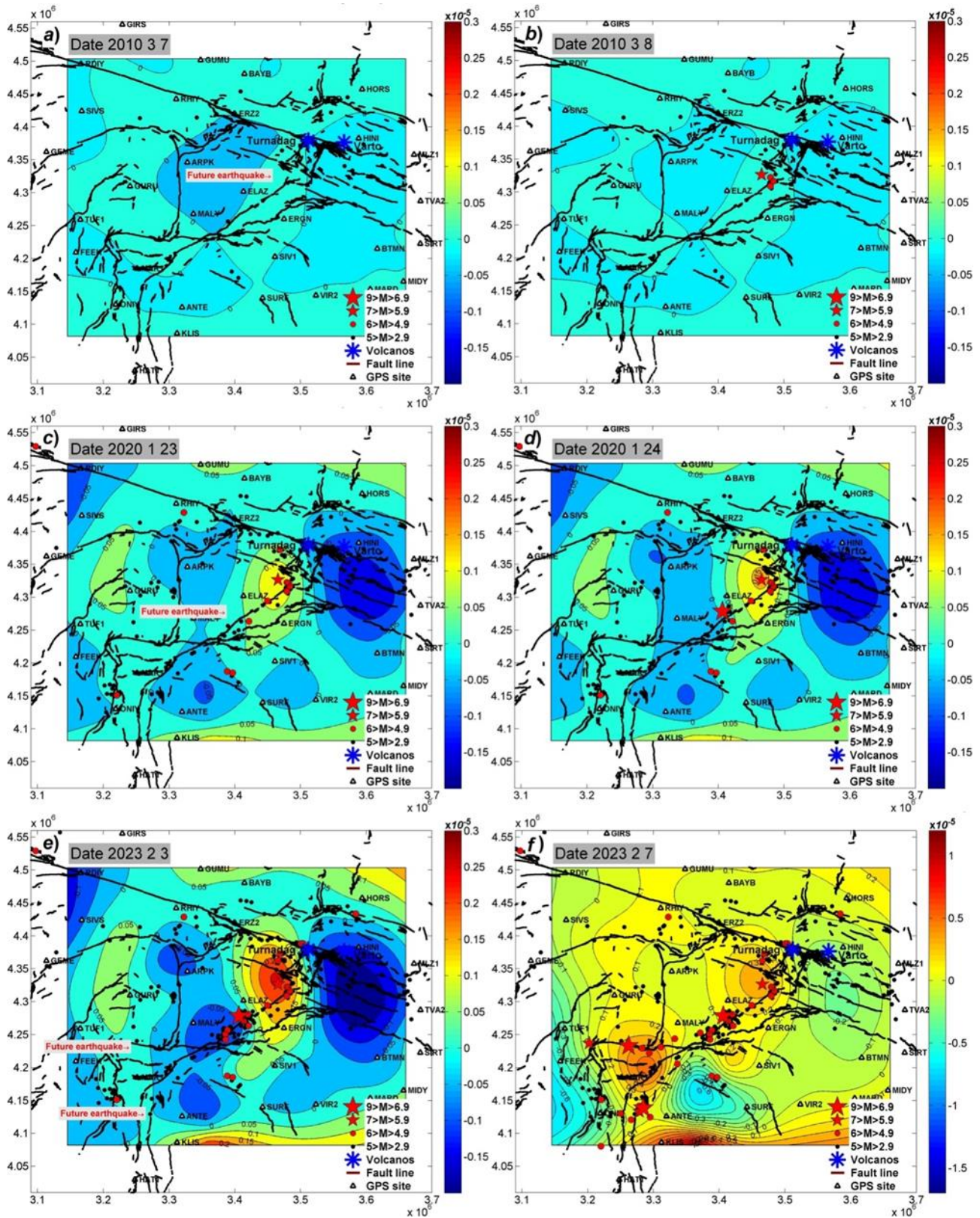


Fig. 1. Evolution of dilatation deformation 2009–2023 in connection with the strongest seismic events

The resulting region of extension (Fig. 1f) coincides with the region of internal displacement deficiency (Fig. 3e) formed before destructive events. In this area, elastic stresses were released (Fig. 3f). The mutually consistent propagation of alternating compression-tension strains in the SW indicates a wave-like stress flow in this direction.

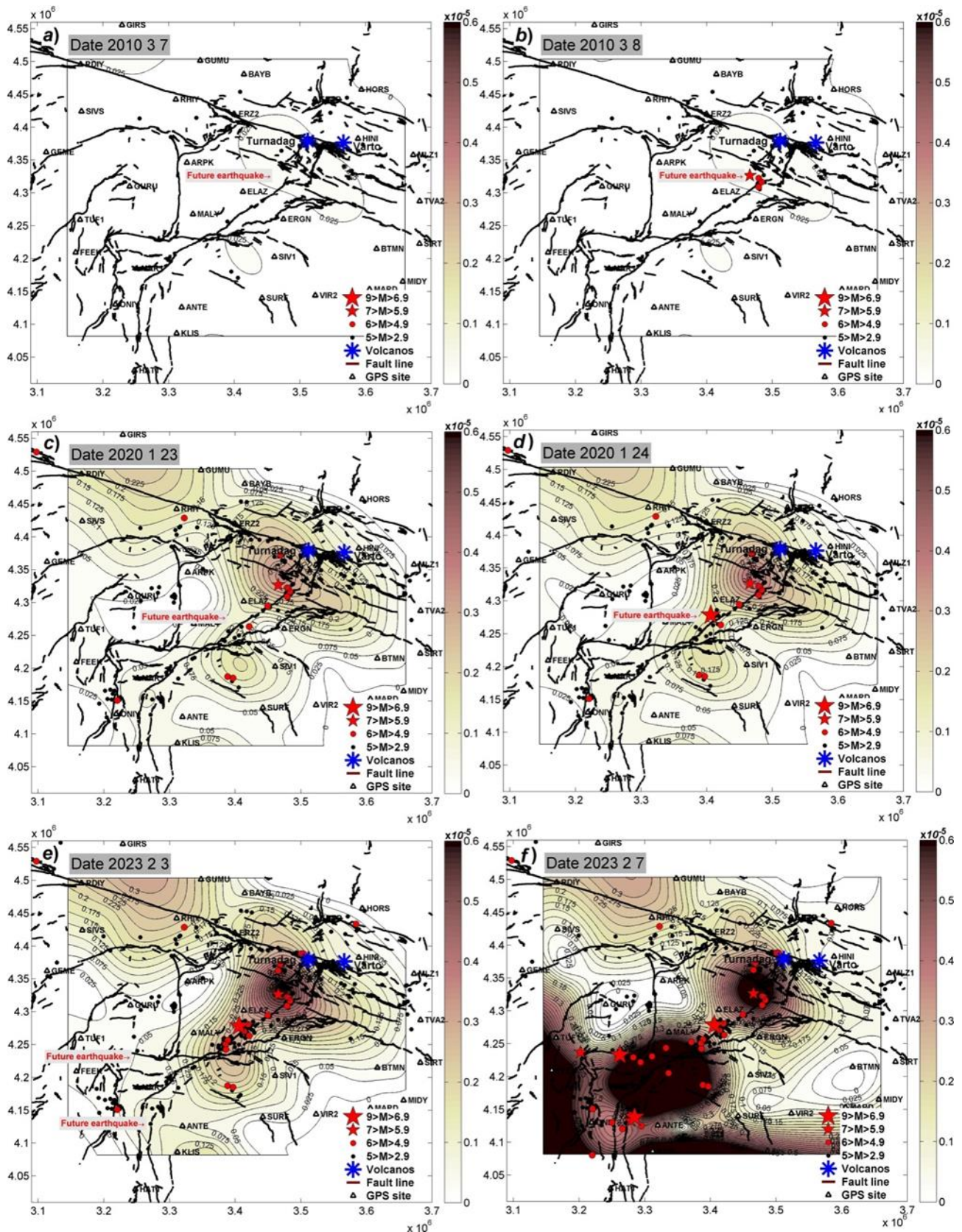


Fig. 2. Evolution of the total shear deformation 2009–2023 in connection with the strongest seismic events

Total shear deformation formed before the 2009 Elazig earthquake, exhibits migration (Fig. 2), propagating simultaneously along the North Anatolian (NAF) and East Anatolian (EAF) faults.

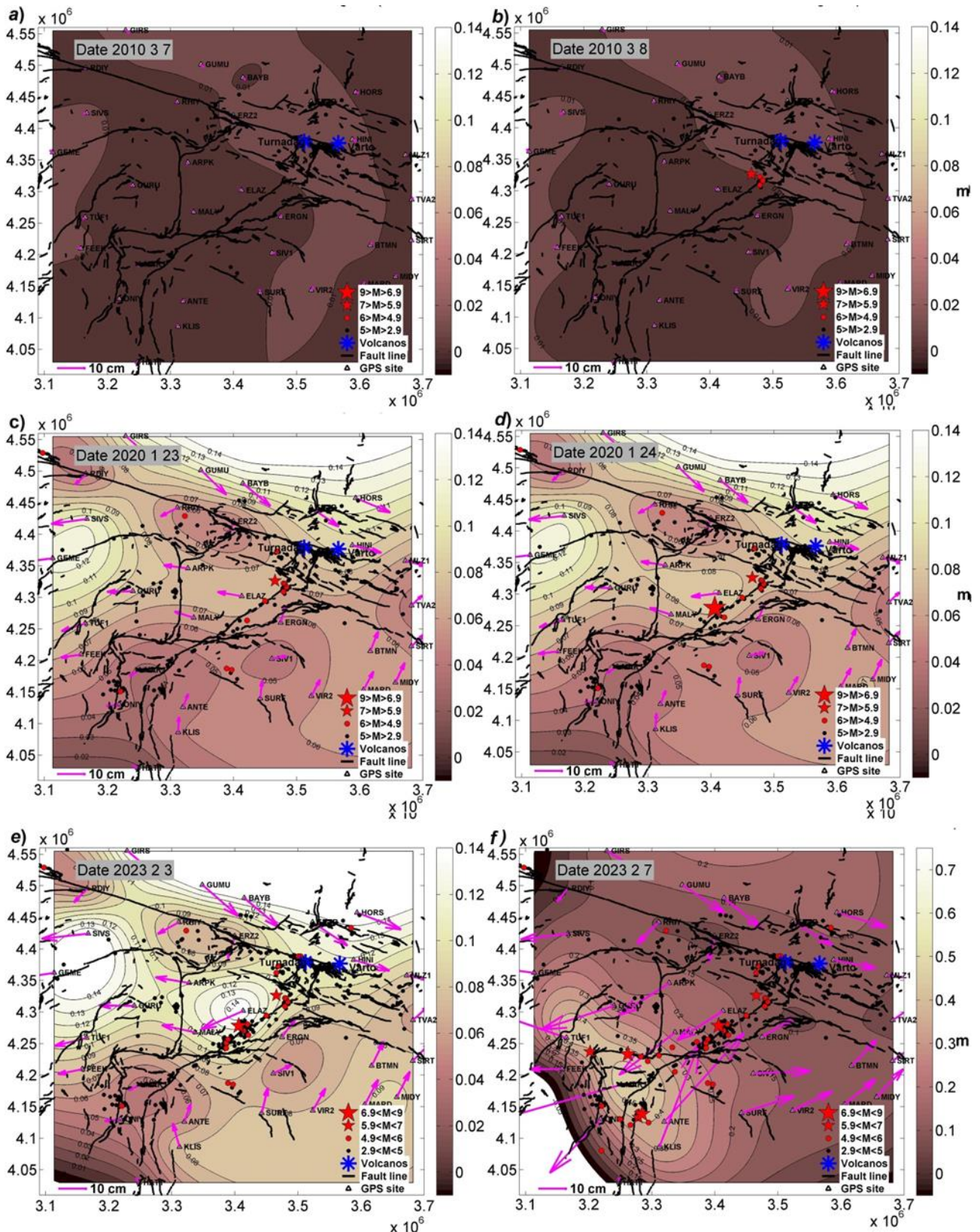


Fig. 3. Evolution of the internal displacement deficit 2009–2023

Two total shear deformation streams are evident in the NNW and SW (Fig. 2).

An important characteristic that makes it possible to detect areas that impede the movement of the upper crust is the deficit of accumulated displacements of GNSS stations. The spatiotemporal evolution of this characteristic is shown in Fig. 3. An interesting circumstance in this case is the fact



that in the direction of the total shear flow from the epicenter of the strong Elazig-Malatya earthquake until the catastrophic earthquakes of February 2023, three moderate earthquakes occurred (Fig. 3e), confirming the migration of seismicity to the SW and contributing to the release of stresses in the epicentral Elazig-Malatya zone. At the front of the seismicity migration direction and the total shear deformation flow, a region of internal displacement deficit matured (Fig. 3c-e) between the two EAF branches. As a result of the February 2023 earthquakes, this area collapsed (Fig. 3f) and was replaced by an area of maximum displacement. The strongest events and their strong aftershocks delineated this area.

The conducted research suggests that the strongest events of 2009–2023 are connected by a unitary seismic deformation process. The most important action in this case is the SW movement of the Anatolian block as monolithic element. In the development of movements and deformations, a flow of increasing stresses is observed in the direction from KTJ to the SW to the area of the strongest seismic events on 02.2023. It originates east of the KTJ where the Arabian Plate encounters an obstacle. We assume a turn in the sublithospheric current in this area, pulling the Arabian Plate to the north.

### **References**

- Dokukin P.A., Guvenaltin M.A., Irmak T.S., Kaftan V.I., Toker M.* Evolution of the crustal inner displacement deficit in a reference to Elazig earthquake series just before occurring the devastate Ekinozu-Nuradagi earthquakes (M7.5–7.8, 2023-02-06) // ESDB repository. GCRAS, Moscow, 2023. DOI: [10.2205/ESDB-Ekinozu-Nurdagi-quakes](https://doi.org/10.2205/ESDB-Ekinozu-Nurdagi-quakes)
- Kaftan V., Guvenaltin M.A., Dokukin P., Toker M., Irmak T.S.* Evolution of the crustal dilatation strain in a reference to Elazig earthquake series // [Data Set]. ResearchGate. December 2022a. DOI: [10.13140/RG.2.2.22192.43526](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22192.43526)
- Kaftan V., Guvenaltin M.A., Dokukin P., Toker M., Irmak T.S.* Evolution of the crustal total shear strain in a reference to Elazig earthquake series // [Data Set]. ResearchGate. December 2022b. DOI: [10.13140/RG.2.2.11287.24489](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11287.24489)
- Kaftan V., Guvenaltin M.A., Dokukin P., Toker M., Irmak T.S.* Evolution of the crustal surface displacements in a reference to Elazig earthquake series // [Data Set]. ResearchGate. December 2022c. DOI: [10.13140/RG.2.2.15481.54882](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15481.54882)

UDC 517.987:550.34

## BOOLEAN DELAY EQUATIONS AND THEIR APPLICATION TO EXPERIMENTAL EARTHQUAKE PREDICTION

Michael Ghil<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup> *Geosciences Department and Laboratoire de Météorologie Dynamique (CNRS and IPSL), Paris, France*

<sup>2</sup> *École Normale Supérieure and PSL University, Paris, France*

<sup>3</sup> *Department of Atmospheric & Oceanic Sciences, University of California at Los Angeles, Los Angeles, USA*

<sup>4</sup> *Departments of Mathematics and of Finance, Imperial College London, London, UK*

Email: [ghil@lmd.ipsl.fr](mailto:ghil@lmd.ipsl.fr)

(oral)

Boolean Delay Equations (BDEs) are semi-discrete dynamical models with Boolean-valued variables that evolve in continuous time [Dee, Ghil, 1984; Ghil, Mullhaupt, 1985]. Systems of BDEs can be classified into conservative or dissipative, in a manner that parallels the classification of ordinary or partial differential equations. Solutions to certain conservative BDEs exhibit growth of complexity in time; such BDEs can be seen therefore as metaphors for biological evolution or human history. Dissipative BDEs are structurally stable and exhibit multiple equilibria and limit cycles, as well as more complex, fractal solution sets, such as Devil's staircases and “fractal sunbursts” [Ghil et al., 2008].

BDE systems have been used as highly idealized models of climate change on several time scales [Darby, Mysak, 1993; Ghil et al., 1987; Saunders, Ghil, 2001; Wright et al., 1990], as well as in earthquake modeling and prediction [Zaliapin et al., 2003a; 2003b], genetics [Öktem et al., 2003], and economics [Colon, Ghil, 2017; Coluzzi et al., 2011]. BDEs with an infinite number of variables on a regular spatial grid have been called “partial BDEs” and we shall mention connections with other types of discrete dynamical systems, including cellular automata and Boolean networks [Coluzzi et al., 2011; Ghil et al., 2008].

Zaliapin et al. [Zaliapin et al., 2003a; 2003b] used the BDE framework to model the dynamics of colliding cascades [Gabrielov et al., 1990a; 1990b], in which a direct cascade of loading interacts with an inverse cascade of failures. [Zaliapin et al., 2003a] formulated and analyzed the BDE model, while Zaliapin et al. [Zaliapin et al., 2003b] applied it to the earthquake prediction problem. The BDE model describes critical transitions that are due to the interaction between direct cascades of loading and inverse cascades of failures in a hierarchical system. More generally, such critical transitions are found in many hierarchical and nonlinear systems, including socio-economic ones.

The interaction between the two cascades in the BDE model is controlled by distinct delays between switching of elements from one state to another: loaded vs. unloaded and intact vs. failed. The model's heuristic constraints rely on more detailed information from seismicity dynamics. Despite its great simplicity and numerical efficiency, this model simulates three basic types of seismic regime that are well known from observations: (1) high and nearly periodic seismicity; (2) intermittent seismicity; and (3) medium or low seismicity. Zaliapin et al. [Zaliapin et al., 2003a] obtained a complete regime diagram in the plane spanned by the loading and the healing delay, including a triple point near which pairwise transitions between all three regimes are possible.

In their BDE model, Zaliapin et al. [Zaliapin et al., 2003b] found four major types of premonitory seismicity patterns (PSPs), which had been previously identified in seismic observations: (i) rise of earthquake clustering; (ii) rise of the earthquakes' intensity; (iii) rise of the earthquake correlation range; and (iv) changes in the Gutenberg–Richter relation that represents the size distribution of earthquakes. Given the incompleteness of actual earthquake catalogs, the model's PSPs suggest features that still need to be verified in observations but could eventually lead to an improvement of real-time PSP-based prediction algorithms [Kossobokov, Shebalin, 2003].

There are indications that the premonitory phenomena considered are not seismicity-specific, but may be common to hierarchical systems of a more general nature. In socio-economic phenomena, the clustering of such phenomena is sometimes referred to as the “broken-window effect” [Ghil et al., 2011]: the rise of the number of broken windows in a neighborhood can foretell acts of major vandalism, many of these might precede the rise in robberies, and those in turn the number of homicides, which can finally lead to rioting [Keizer et al., 2008; Kelling et al., 1983]. Such a chain of events resembles phenomenologically the clustering of small, increasingly large, and finally major earthquakes. This approach, though, does not address in any way the issues of causality, and hence of remediation of such sociological occurrences; it only addresses prediction and law enforcement issues.

To conclude, we outline a BDE model for block-and-fault dynamics (BAFD) that applies substantial simplifications to the real-variable BAFD model of [Gabrielov et al., 1990]. These simplifications resemble the ones that [Zaliapin et al., 2003a; 2003b] applied to the [Gabrielov et al., 2000a; 2000b] model of colliding cascades. The greater simplicity and numerical efficiency of such a BDE model of BAFD could provide additional insights into lithospheric dynamics, too.

*This paper is dedicated to the memory of V.I. Keilis-Borok (VKB), the founder of the Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics (IEPT) of originally the USSR Academy of Sciences and now the Russian Academy of Sciences (RAS); of Ilya Zaliapin, VKB's and my joint associate at UCLA; and of A.A. Soloviev, VKB's successor as Director of the IEPT (1998–2017). It is a pleasure to thank many other members of the IEPT for interesting exchanges over the years, first at UCLA and later at the Ecole Normale Supérieure and the Institut de Physique du Globe in Paris.*

### References

- Colon C., Ghil M. Economic networks: Heterogeneity-induced vulnerability and loss of synchronization // *Chaos*. 2017. V. 27. Article 126703. DOI:[10.1063/1.5017851](https://doi.org/10.1063/1.5017851)
- Coluzzi B., Ghil M., Hallegatte S., Weisbuch G. Boolean delay equations networks in economics and the geosciences // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2011. V. 21. No 12. P. 3511–3548. DOI:[10.1142/S0218127411030702](https://doi.org/10.1142/S0218127411030702)
- Darby M.S., Mysak L.A. A Boolean delay equation model of an interdecadal Arctic climate cycle // *Climate Dynamics*. 1993. V. 8. P. 241–246. DOI:[10.1007/BF00198618](https://doi.org/10.1007/BF00198618)
- Dee D., Ghil M. Boolean difference equations, I: Formulation and dynamic behavior // *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 1984. V. 44. P. 111–126. DOI:[10.1137/0144009](https://doi.org/10.1137/0144009)
- Gabrielov A.M., Levshina T.A., Rotwain I.M. Block model of earthquake sequence // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1990. V. 61. No 1–2. P. 18–28. DOI:[10.1016/0031-9201\(90\)90091-B](https://doi.org/10.1016/0031-9201(90)90091-B)
- Gabrielov A., Keilis-Borok V., Zaliapin I., Newman W.I. Critical transitions in colliding cascades // *Physical Review E*. 2000a. V. 62. P. 237–249. DOI:[10.1103/PhysRevE.62.237](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.237)
- Gabrielov A.M., Zaliapin I.V., Newman W.I., Keilis-Borok V.I. Colliding cascades model for earthquake prediction // *Geophysical Journal International*. 2000b. V. 143. P. 427–437. DOI:[10.1046/J.1365-246X.2000.01237.X](https://doi.org/10.1046/J.1365-246X.2000.01237.X)
- Ghil M., Mullhaupt A. Boolean delay equations, II: Periodic and aperiodic solutions // *Journal of Statistical Physics*. 1985. V. 41. P. 125–174.
- Ghil M., Mullhaupt A., Pestiaux P. Deep water formation and Quaternary glaciations // *Climate Dynamics*. 1987. V. 2. P. 1–10.
- Ghil M., Zaliapin I., Coluzzi B. Boolean delay equations: A simple way of looking at complex systems // *Physica D*. 2008. V. 237. P. 2967–2986. DOI:[10.1016/j.physd.2008.07.006](https://doi.org/10.1016/j.physd.2008.07.006)
- Ghil M., Yiou P., Hallegatte S., Malamud B.D., Naveau P., Soloviev A., Friederichs P., Keilis-Borok V., Kondrashov D., Kossobokov V., Mestre O., Nicolis C., Rust H., Shebalin P., Vrac M., Witt A., Zaliapin I. Extreme events: Dynamics, statistics and prediction // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2011. V. 18. P. 295–350. DOI:[10.5194/npg-18-295-2011](https://doi.org/10.5194/npg-18-295-2011)
- Ismail-Zadeh A., Soloviev A. Numerical modelling of lithospheric block-and-fault dynamics: what did we learn about large earthquake occurrences and their frequency? // *Surveys in Geophysics*. 2022. V. 43. No 2. P. 503–528. DOI:[10.1007/s10712-021-09686-w](https://doi.org/10.1007/s10712-021-09686-w)
- Keizer K., Lindenberg S., Steg L. The spreading of disorder // *Science*. 2008. V. 322. P. 1681–1685. DOI:[10.1126/science.1161405](https://doi.org/10.1126/science.1161405)
- Kelling G.L., Wilson J.Q. Broken windows // *Atlantic Monthly*. 1982. V. 249. P. 29–38.
- Kossobokov V., Shebalin P. Earthquake prediction. In *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction* / V.I. Keilis-Borok, A.A. Soloviev (eds.). Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2003. P. 141–207.
- Öktem H., Pearson R., Egiiazarian K. An adjustable aperiodic model class of genomic interactions using continuous time Boolean networks (Boolean delay equations) // *Chaos*. 2003. V. 13. No 4. P. 1167–1174. DOI:[10.1063/1.1608671](https://doi.org/10.1063/1.1608671)

- Saunders A., Ghil M.* A Boolean delay equation model of ENSO variability // *Physica D*. 2001. V. 160. P. 54–78.
- Wright D.G., Stocker T.F., Mysak L.A.* A note on Quaternary climate modelling using Boolean delay equations // *Climate Dynamics*. 1990. V. 4. P. 263–267. DOI:[10.1007/BF00211063](https://doi.org/10.1007/BF00211063)
- Zaliapin I., Keilis-Borok V., Ghil M.* A Boolean delay equation model of colliding cascades. I: Multiple seismic regimes // *Journal of Statistical Physics*. 2003a. V. 111. P. 815–837. DOI:[10.1023/A:1022850215752](https://doi.org/10.1023/A:1022850215752)
- Zaliapin I., Keilis-Borok V., Ghil M.* A Boolean delay equation model of colliding cascades. II: Prediction of critical transitions // *Journal of Statistical Physics*. 2003b. V. 111. P. 839–861. DOI:[10.1023/A:1022802432590](https://doi.org/10.1023/A:1022802432590)

UDC 550.343

## LOCAL VARIATIONS IN THE GEOMAGNETIC FIELD, HELIUM AND RADON CONCENTRATIONS IN WELLS AS POSSIBLE MEDIUM- AND SHORT-TERM PRECURSORS OF STRONG EARTHQUAKES USING THE EXAMPLE OF ARMENIA

Grigorian A.G.<sup>1</sup>, Baranov A.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow, Russia*

E-mail: [aabaranov@gmail.com](mailto:aabaranov@gmail.com)

(oral)

**Abstract.** Using the example of the Spitak and Paravan earthquakes, anomalous changes in the variable geomagnetic field  $T\delta$ , helium and radon concentrations are considered as possible medium- and short-term precursors of strong earthquakes.

**Keywords:** anomalous variations of the geomagnetic field, earthquake precursors, processes in the Earth's crust, electrical conductivity

Although the magnitude of the alternating magnetic field is insignificant compared to the magnitude of the constant field of the Earth, nevertheless, its study is of great scientific interest. The local variations of this field carry information about changes in the electrical conductivity of the geological environment associated with geodynamic processes in the earth's crust.

The electromagnetic induction created in the Earth by  $Sq$ - and bay-like variations of the magnetic fields characterizes the state of the medium, since the magnitude of the local magnetic response of the medium to external variations depends on the electrical conductivity, dielectric and magnetic permeability of its constituent structures.

Materials (recordings on photo tapes) obtained at three magnetic variation stations of the Republic of Armenia for 1986–1993 were studied. Using the calculated parameter  $N(A)$ , which is the ratio of the amplitudes of geomagnetic field variations of external origin, measured synchronously at different pairs of stations. The calculated parameter  $N(A)$  characterizes the change in electromagnetic induction or electrical conductivity of the geological medium  $N(A) = N_i / N_j$ , where  $i$  and  $j$  are different observation points [Vanyan, Hindman, 1996; Grigorian, 2007]. The background value of the parameter is considered to be the period when the parameter tends to 1,  $N(A) \sim 1.0$ . Figures 1, 2, 3 show anomalous changes in the calculated parameter  $N(A)$  for  $Sq$  and bay-shaped variations (30–60 and 5–25 min) of the horizontal and vertical components  $T\delta$ . They began about six months before the Spitak earthquake.

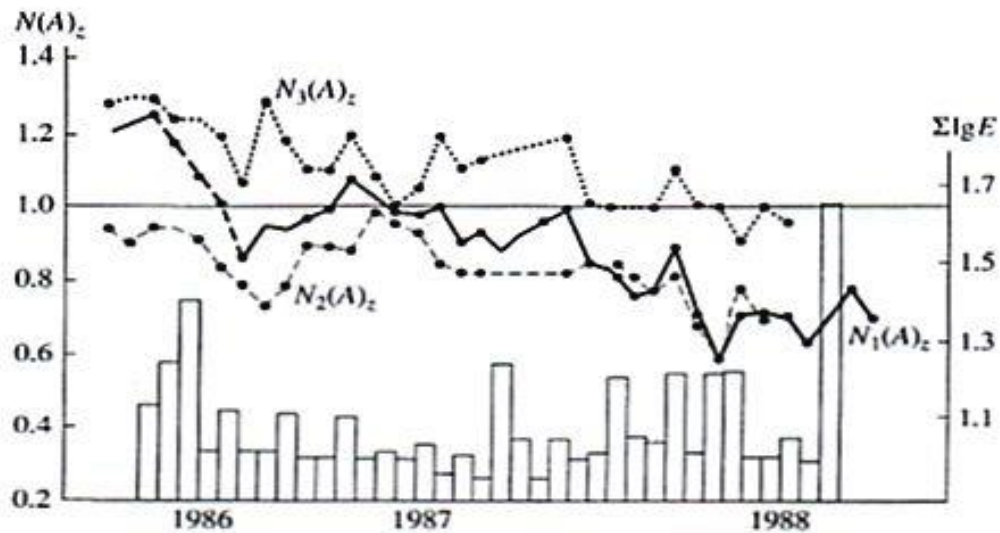


Fig. 1. Change in  $N(A)$  for  $Sq$  variations between all stations for  $\delta Z$ :  $N_1(A)_Z$  – Jradzor-Tovuz,  $N_2(A)_Z$  – Jradzor-Garni,  $N_3(A)_Z$  – Garni-Tovuz.  $E$  is the total released seismic energy by month

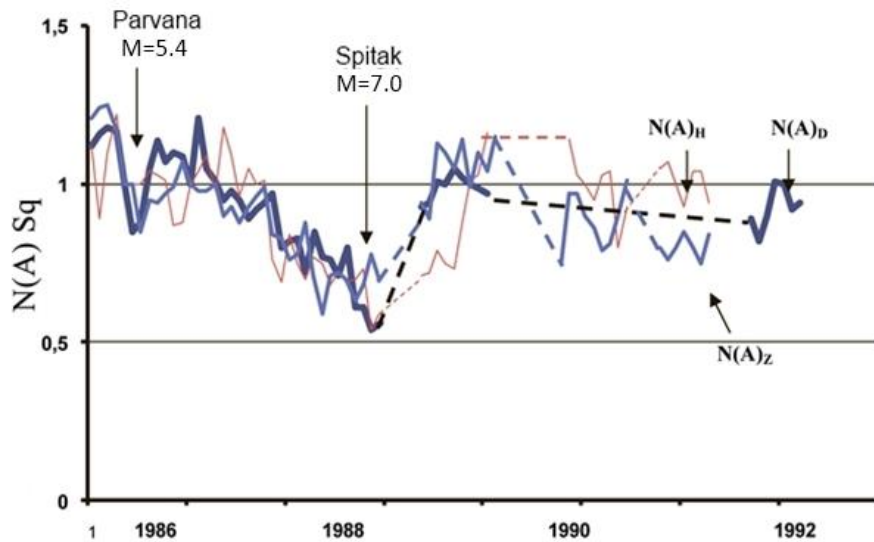


Fig. 2. Change of monthly average values of parameter  $N(A)$  for  $Sq$  variations of components  $\delta D$ ,  $\delta H$  and  $\delta Z$  of geomagnetic field between Jradzor-Tovuz stations for the period 1986–1993

Analysis of data two months before the Paravan earthquake also shows a sharp drop in the values of this parameter by 20–25%. In the interval between two earthquakes, the ratios of bay-shaped variations lie within  $\pm 10\%$  with a background value of 1. For  $Sq$  variations of the  $\delta D$ ,  $\delta H$  and  $\delta Z$  components of the geomagnetic field, a sharp drop was observed approximately a month before the Paravan earthquake from 1.2 to 0.8.

After the Paravan earthquake, the values of the calculated parameter  $N(A)$  for all three components normalized. Since mid-1987 abnormal changes began again. Further, up to the Spitak earthquake, a monotonic decrease in all three components of the geomagnetic field was observed from 1.2 to 0.54. After this earthquake, the parameter  $N(A)$  returns almost to background values (Fig. 2). This suggests that the process we observed was reversible.

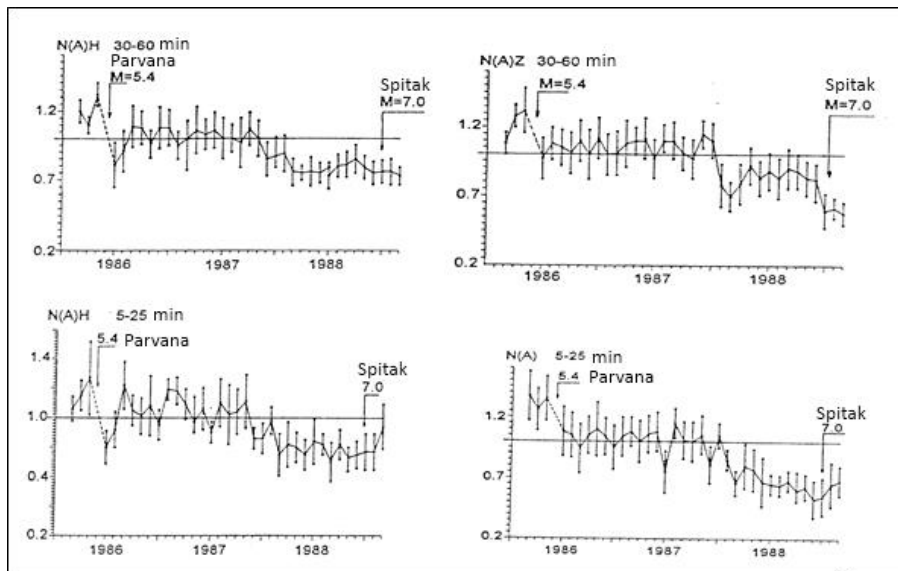


Fig. 3. Change in parameter  $N(A)$  for bay-shaped variations with periods of 30–60 and 5–25 minutes. components  $\delta H$  and  $\delta Z$  of the variable geomagnetic field  $\delta T$ , between the stations Jradzor and Tovuz

In Armenia, long before the Spitak earthquake, monitoring of radon and helium concentrations was organized in the cities of Leninakan and Jermuk [Basentsyan, Rudakov, 1989; Igumnov, Stepanyan, 1989]. In Leninakan, after the earthquake, registration was resumed only a week later. An operational precursor in the field of subsoil radon at the Jermuk and Leninakan stations appeared directly on the day of the earthquake (no measurements were taken at the stations at night), and was expressed at the Jermuk station in a sharp increase in radon concentration (Fig. 4b). And at the Leninakan station, the operational precursor was expressed in a sharp decrease in the concentration of radon, which was recorded several hours before the earthquake (Fig. 4a).

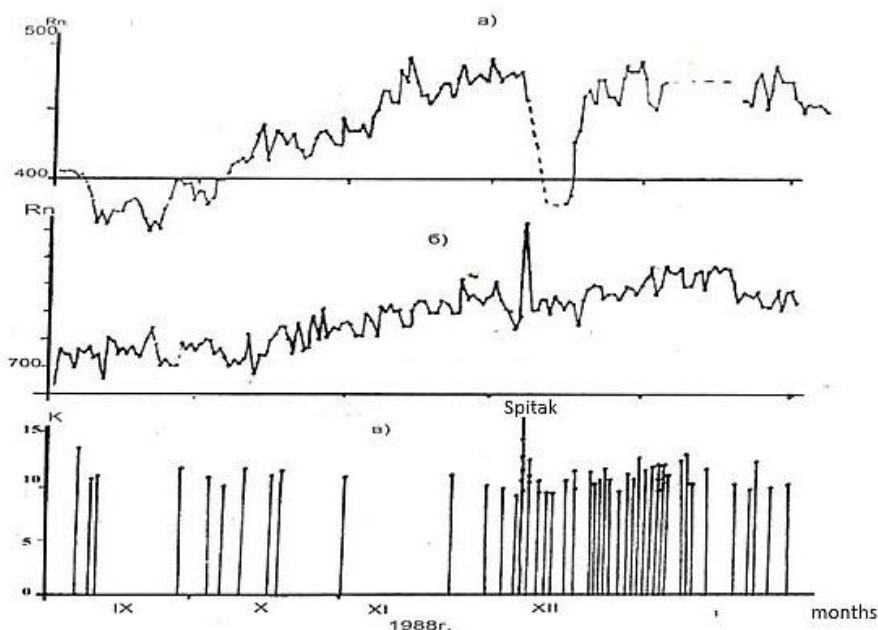


Fig. 4. Changes in the concentration of subsoil radon at Leninakan (a) and Jermuk (b) stations. Energy class of seismic events (c)



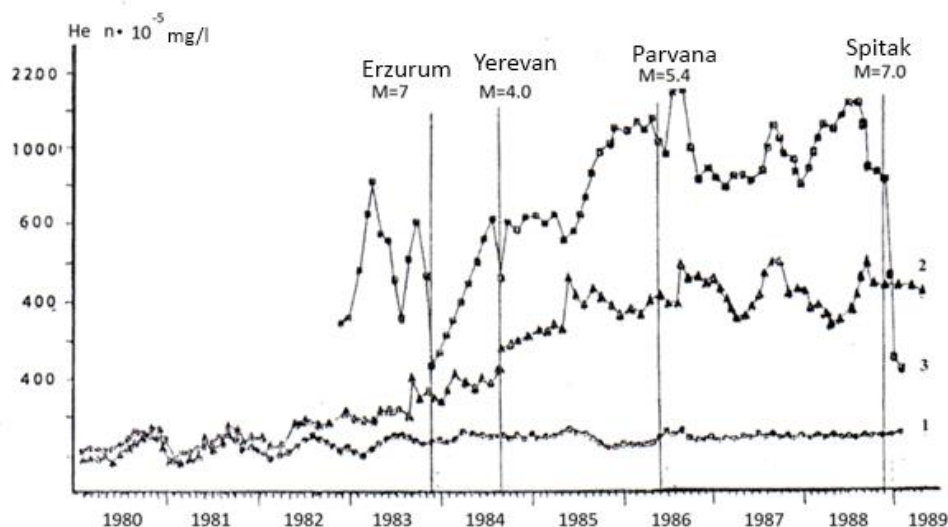


Fig. 5. Concentration of dissolved helium in observation wells of the Armenia. 1 – well Ararat, 2 – well Surenavan, 3 – well Kajaran. Earthquakes: Erzurum 1983  $M = 7.0$ , Yerevan 1984  $M = 4.0$ , Parvaniy 1986  $M = 5.4$ , Spitak 1988  $M = 7.0$

Fig. 5 shows the concentrations of dissolved helium in wells on the territory of Armenia (monthly average values). At the Kajaran well, a sharp drop in the amount of dissolved helium was recorded before all strong earthquakes.

**Conclusions.** Anomalous changes in the local geomagnetic field (parameter  $N(A)$ ) for the period 1986–1988 for the studied territory of Armenia, apparently due to changes in the physical properties of the geological environment and allow us to consider these anomalies as medium-term precursors of two large earthquakes: Paravan ( $M = 5.4$ , 1986) and Spitak ( $M = 7.0$ , 1988).

Sharp jumps in helium and radon concentrations in wells are also associated with the development of the geodynamic process in preparation for a strong earthquake and makes it possible to use these changes as a short-term precursor (days-hours).

*The work was partially carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the Russian Academy of Sciences No. AAAA-A19-119011490131-3.*

### References

- Basentsyan M.M., Rudakov V.P. Radon precursor of the Spitak earthquake of December 7, 1988 // News of the Academy of the Armenian SSR, Earth Sciences. 1989. V. XLII. No 3. P. 64–66.
- Grigorian A.G. Local geomagnetic field variations of external origin: A case study of Armenia // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2007. V. 43. No 6. P. 524–531. DOI:[10.1134/S1069351307060109](https://doi.org/10.1134/S1069351307060109)
- Igumnov V.A., Stepanyan Z.G. Some hydrogeochemical aspects of the Spitak earthquake // News of the Academy of the Armenian SSR, Earth Sciences. 1989. V. XL. No 3. P. 24–33.
- Vanyan L.L., Hindman R.D. On the Origin of Electrical Conductivity in the Consolidated Crust // Izvestiya Physics of the Solid Earth. 1996. V. 32. No 4. P. 266–271.

UDC 517.9

## PHASE RETRIEVAL AND PHASELESS INVERSE SCATTERING WITH BACKGROUND INFORMATION

Hohage T.<sup>1</sup>, Novikov R.G.<sup>2,3</sup>, Sivkin V.N.<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Institute of Numerical and Applied Mathematics, Univ. Göttingen, German

<sup>2</sup> Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,  
Moscow, Russia

<sup>3</sup> CMAP, CNRS, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau,  
France

<sup>4</sup> Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia

E-mail: [novikov@cmmap.polytechnique.fr](mailto:novikov@cmmap.polytechnique.fr)

(oral)

**Keywords:** Fourier analysis, Helmholtz equation, phase retrieval problem, phaseless inverse scattering, numerical reconstructions

We consider the problem of finding a compactly supported function  $v$  from the absolute value of its Fourier transform  $|Fv|^2$  on a ball in  $R^d$ ,  $d \geq 1$ . To compensate for the missing phase information we use the method of a priori known background information. In particular, we present theoretical and numerical results on finding  $v$  from absolute value of the Fourier transform  $|F(v+w)|^2$ , where  $w$  is an a priori known non-zero compactly supported function, which is sufficiently separated from  $v$ . Then we apply these results on the phase retrieval problem of Fourier analysis to iterative monochromatic phaseless inverse scattering for the Helmholtz equation in dimension  $d \geq 2$ .

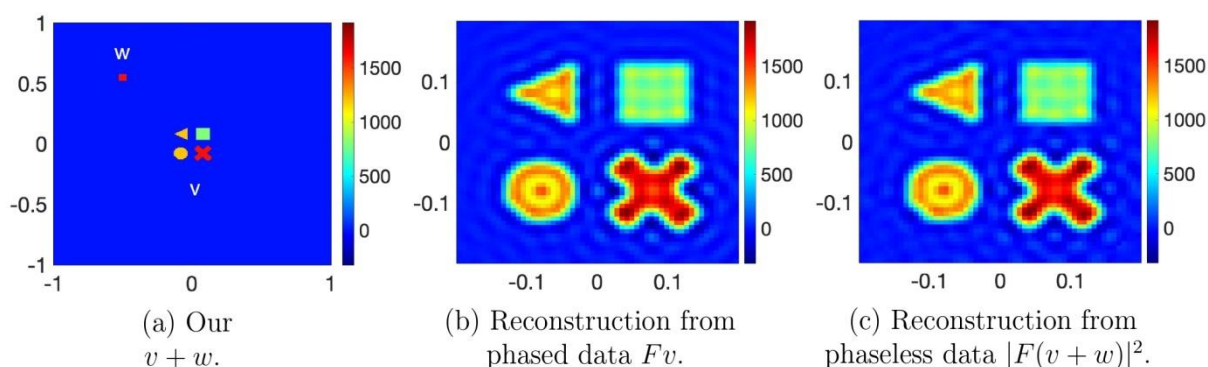


Fig. 1. Example of our phase retrieval reconstruction for  $d = 2$

### References

- Hohage T., Novikov R.G., Sivkin V.N. Phase retrieval and phaseless inverse scattering with background information // hal-03806616. 2022.
- Novikov R.G., Sivkin V.N. Phaseless inverse scattering with background information // Inverse Problems. 2021. V. 37. No 5. Article 055011. DOI:[10.1088/1361-6420/abf36c](https://doi.org/10.1088/1361-6420/abf36c)

UDC 550.34

## THE FORECAST OF TSUNAMIGENIC EARTHQUAKE IN ASIA-OCEANIA

Shanker D., Sabah N.

*Department of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology, Roorkee, India*

*E-mail: [d.shanker@eq.iitr.ac.in](mailto:d.shanker@eq.iitr.ac.in)*

(oral)

**Abstract.** This study presents the forecasting of time, magnitude and size of the next tsunamigenic earthquake in Asia-Oceania, using four probability distribution models (Gamma, Lognormal, Weibull and Log-logistic) considering the concept of seismic energy stored. The ratio of conditional probabilities of total seismic energy stored (TSE) and total seismic energy stored per year (TSE/year) is used to forecast the time and magnitude of seismic energy release in the future.

**Keywords:** tsunami, magnitude, seismic, Asia-Oceania, forecasting

### Introduction

A tsunamigenic earthquake is resulted by a renewal process in which, the potential energy stored in the rocks due to strain-accumulation over long periods of time is released after nearly periodic intervals of time. The probability of occurrence of the next tsunamigenic earthquake event goes on increasing until the occurrence of the next event.

### Study area and Data

The Indo-Pacific region considered in this study ranges between Latitudes  $60^{\circ}\text{N}$ – $30^{\circ}\text{S}$  and Longitudes  $90^{\circ}\text{E}$ – $180^{\circ}\text{E}$ . The region is divided into 6 zones (zones 1 in the Indian Ocean and zones 2–6 in the western Pacific Ocean) based on past tsunamigenicity (Fig. 1). The data on historical and recent tsunamigenic earthquakes have been collected from NOAA, NTL Russia and [Sabah, Shanker, 2022].

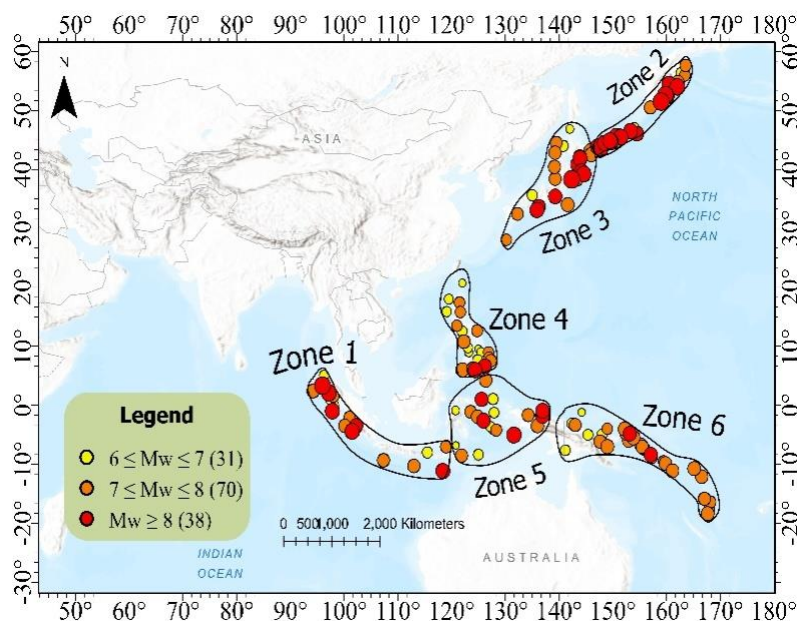


Fig. 1. Tsunamigenic earthquakes in the region from 1700–2022 ( $6 \leq M_w \leq 9.2$ )

## Methodology

The seismic energy-magnitude relationship ( $\text{Log } E = 11.8 + 1.5 \times M_w$ ) suggested by [Gutenberg, Richter, 1956] is used to calculate the total seismic energy stored (TSE) during the past tsunamigenic earthquakes. Seismic energy stored per year (TSE/year) is also calculated by dividing TSE with the time elapsed between two events. Conditional probability approach (using Gamma, Lognormal, Log-Logistic and Weibull distributions) has been used to estimate the expected maximum TSE and TSE/year. The ratio of TSE and TSE/year gives the time of occurrence of the next tsunamigenic event.

## Results

The conditional probability of expected seismic energy release in terms of TSE and TSE per year is presented in Fig. 2 (a, b) for 6 zones of study as a multiple of  $10^{15}$  Joules. TSE corresponding to the probability range (0.95–1) and TSE/year corresponding to the probability range (0.85–9) is noted [Zarola, Sil, 2018]. Table presents a tsunami forecast for 6 zones of Asia-Oceania. The expected magnitude of the tsunamigenic earthquake is calculated by back-substituting TSE in the seismic energy-magnitude relationship ( $\text{Log } E = 11.8 + 1.5 \times M_w$ ).

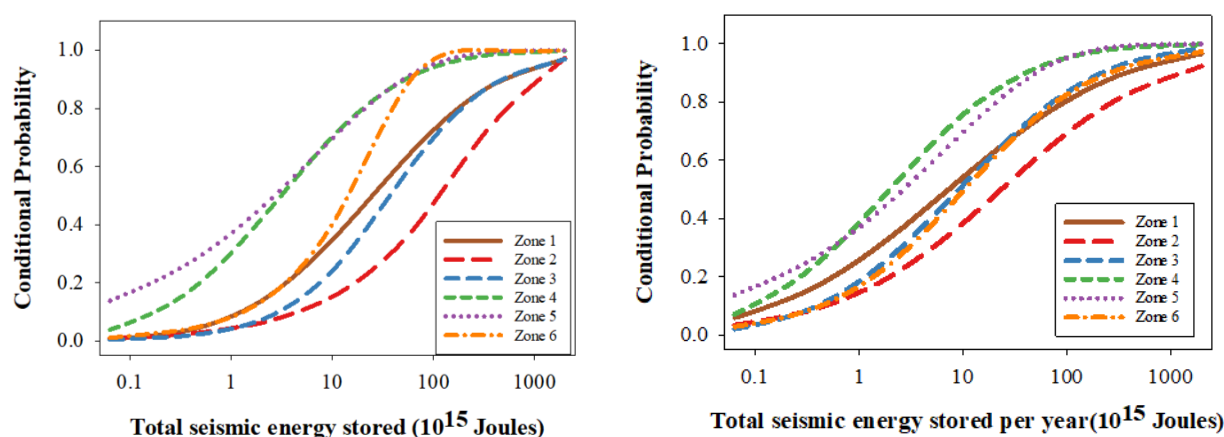


Fig. 2. Conditional probability for various combination of a) TSE and b) TSE/year

Table. Tsunami forecast for 6 tsunamigenic zones of Asia-Oceania.  $T_{tp}$ ,  $M_{tp}$  represent the time and moment magnitude of the preceding tsunamigenic earthquake respectively.  $T_{tf}$ ,  $M_{tf}$  and  $L_{tf}$  are the predicted time, magnitude and location of the future tsunamigenic earthquake

Zone	$T_{tp}$	$(M_{tp})$	$T_{tf}$	$M_{tf}$	$L_{tf}$
					(Lat, Lon, Focal Depth)
1	25-10-2010	7.7	2047–2054	8.9–9.1	(2.36 <sup>0</sup> S, 102.12 <sup>0</sup> E, 42.53 km)
2	13-01-2007	8.1	2047–2053	8.9–9.2	(48.80 <sup>0</sup> N, 154.84 <sup>0</sup> E, 30.39 km)
3	11-03-2011	9.1	2032–2036	8–8.5	(38.71 <sup>0</sup> N, 140.10 <sup>0</sup> E, 25.50 km)
4	05-03-2002	7.5	2103–2113	7.5–8	(10.84 <sup>0</sup> N, 123.73 <sup>0</sup> E, 25.30 km)
5	14-03-2006	6.7	2048–2053	7.5–8	(2.78 <sup>0</sup> S, 128.45 <sup>0</sup> E, 26.90 km)
6	29-03-2015	7.5	2025–2029	8–8.5	(8.03 <sup>0</sup> S, 155.16 <sup>0</sup> E, 30.47 km)

## Conclusion

The present study describes the probabilistic assessment and fore-casting of time and magnitude of the future tsunamigenic earthquakes for six for tsunamigenic zones of the Asia-Oceania India using four distribution models (Gamma, Lognormal, Weibull and Log-logistic). Zones 3 and 4 are likely to experience strong tsunami in the next 10–15 years. The strongest magnitude of tsunamigenic earthquake is expected for Zones 1 and 2 ( $8.9 \leq M_W \leq 9.2$ ) between the years 2047 and 2054.

## References

- Gutenberg B., Richter C.F.* Magnitude and energy of earthquakes // *Annals of Geophysics*. 1956. V. 9. No 1. P. 7–12.
- Sabah N., Shanker D.* Developing a Comprehensive Historical Tsunami Database for the Indian Ocean. In *Symposium in Earthquake Engineering*. Singapore: Springer Nature Singapore. 2022. P. 353–362.
- Zarola A., Sil A.* Forecasting of future earthquakes in the northeast region of India considering energy released concept // *Computers and Geosciences*. 2018. V. 113. P. 1–13. DOI:[10.1016/j.cageo.2018.01.003](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.01.003)



## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

25-26 октября 2023 года  
ИТПЗ РАН, Москва

### ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

**25 октября (среда)**

<b>12:00</b>	<b>Регистрация участников, приветственный кофе</b> (холл у Конференц-зала ИКИ РАН)
<b>13:00</b>	<b>Открытие конференции</b> (Конференц-зал ИКИ РАН)
<b>Пленарная сессия</b> <b>Конвинер – А.И. Горшков</b> (Конференц-зал ИКИ РАН)	
<b>13:30</b>	<b>Горшков А.И. (ИТПЗ РАН)</b> Александр Анатольевич Соловьев: жизнь в науке
<b>13:45 online</b>	<b>Panza G.F. (Accademia Nazionale Dei Lincei, Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL)</b> A.Soloviev – a scientist and a man
<b>14:00</b>	<b>Кофе</b> (Зимний сад ИКИ РАН)
<b>Пленарная сессия</b> <b>Конвинер – В.Г. Кособоков</b> (Конференц-зал ИКИ РАН)	
<b>14:30</b>	<b>Соловьев Ан.Ал. (ГЦ РАН, ИФЗ РАН)</b> Геомагнитный эффект землетрясений $M_w = 7.5-7.8$ в Турции 6 февраля 2023 года
<b>14:45 online</b>	<b>Shanker D., Sabah N. (Department of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology, Roorkee, India)</b> The forecast of tsunamigenic earthquake in Asia-Oceania
<b>15:00</b>	<b>Мартышко П.С., Ладовский И.В., Цидаев А.Г., Бызов Д.Д. (ИГФ УрО РАН)</b> Построение трехмерных сейсмоплотностных моделей земной коры с использованием параллельных алгоритмов
<b>15:15</b>	<b>Турунтаев С.Б. (ИДГ РАН)</b> Возникновение сейсмогенерирующих подвижек при закачке жидкости вблизи тектонического разлома
<b>15:30</b>	<b>Розенберг В.Л. (ИММ УрО РАН, УрФУ)</b> Сферическая блоковая модель динамики и сейсмичности литосферы: современное состояние и перспективы развития

<b>15:45</b>	<b>Кособоков В.Г.</b> ( <i>ИТПЗ РАН, Международная организация по сейсмической безопасности (ISSO), Италия</i> ), Некрасова А.К. ( <i>ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН</i> ) Смертоносные землетрясения 2023 года: неожиданные сюрпризы?
<b>16:00</b>	<b>Михайлов В.О.</b> , Бабаянц И.П., Волкова М.С., Тимошкина Е.П. ( <i>ИФЗ РАН</i> ), Смирнов В.Б. ( <i>ИФЗ РАН, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова</i> ) Смещения земной поверхности в области землетрясения в Турции 06.02.2023 на косейсмическом и постсейсмическом этапе и модель сейсмического разрыва по данным спутниковой радарной интерферометрии
<b>16:15 online</b>	<b>Лобковский Л.И.</b> ( <i>ИО РАН</i> ), Баранов А.А. ( <i>ИТПЗ РАН</i> ), Рамазанов М.М. ( <i>ИО РАН</i> ) Разрушение ледников Антарктиды, активизация подледного вулканизма и повышение уровня моря – как возможное следствие триггерного эффекта от деформационных волн сильнейших землетрясений в зонах субдукции юга Тихого океана

**25 октября (среда) 16:30-18:00**

<b>СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ</b> <b>Конвинер – А.П. Кержаев</b> (Конференц-зал ИКИ РАН)	
<b>Сафронов А.Н.</b> ( <i>ИФА РАН</i> ) Планетарные процессы как причина сильных землетрясений	
<b>Кержаев А.П.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ), Меньшова И.В. ( <i>ИТПЗ РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана</i> ) Перераспределение остаточных напряжений в результате образования разрыва	
<b>Аглетдинов Э.А.</b> ( <i>Тольяттинский государственный университет</i> ) Особенности сигналов акустической эмиссии при деформировании микрокристаллов цинка	
<b>Скоркина А.А.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Спектральные характеристики записей сильных движений на примере Култукского землетрясения	
<b>Родкин М.В.</b> ( <i>ИТПЗ РАН, ИПНГ РАН</i> ), Прохорова Т.В., Рукавишникова Т.А. ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Тенденция уменьшения вызванной сейсмичности при продолжительном сильном техногенном воздействии?	
<b>Гравиров В.В.</b> ( <i>ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН</i> ) Цифровые системы сбора геофизической информации: способы проверки работоспособности в полевых условиях	
<b>Семка М.А.</b> , Горшков А.И. ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Геолого-геофизические особенности мест сильнейших землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса и Яванского желоба	
<b>Костин В.М.</b> , Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. ( <i>ИЗМИРАН</i> ) О возможности краткосрочного предсказания сильных землетрясений по метеорологическим данным прогноза развития тропических циклонов	
<b>Ерохин А.М.</b> , Венедиктов К.В. ( <i>ООО «Петровайзер»</i> ), Лобанов А.М., Белов А.П. ( <i>МГРИ</i> ) Анализ естественных низкочастотных колебаний горных пород с помощью кварцевого гравиметра для решения прикладных задач геологии	
<b>Кухмазов А.С.</b> , Гоев А.Г. ( <i>ИДГ РАН</i> ) Глубинное строение среды в районе Хибинского и Ловозерского массивов (Кольский полуостров) на основе миграции данных $P_s$ и $S_p$ функций приемника	
<b>Маточкина С.Д.</b> ( <i>ИТПЗ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова</i> ) Проверка выполнения закона продуктивности землетрясений в условиях лабораторных экспериментов по разрушению горных пород	
<b>Малютин П.А.</b> ( <i>ИТПЗ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова</i> ) Влияние закачки флюида на эволюцию сейсмического режима	

26 октября (четверг)

<b>Сессия 1. Оценка сейсмической опасности, современные методы прогноза землетрясений</b> <b>Конвинер – В.А. Тимофеева</b> (Конференц-зал ИКИ РАН)	
<b>10:00 online</b>	<b>Куляндина А.С.</b> (ЯФ ФИЦ ЕГС РАН, СВФУ) Пространственная корреляция разломной структуры и распределения очагов землетрясений на территории Чекуровской антиклинали
<b>10:15</b>	<b>Смирнов В.Б., Петрушов А.А.</b> (Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН) Стадийность проявления аномалий сейсмического режима перед землетрясениями Камчатки, Японии и Исландии
<b>10:30 online</b>	<b>Ружич В.В., Левина Е.А.</b> (ИЗК СО РАН), Бержинская Л.П. (ИЗК СО РАН, ИРНИТУ) Об использовании данных среднесрочного прогноза при оценках сейсмической опасности в Прибайкалье
<b>10:45 online</b>	<b>Левина Е.А.</b> (ИЗК СО РАН) Формализация выявления сейсмогеологических признаков подготовки землетрясения на примере Байкальской рифтовой зоны
<b>11:00 online</b>	<b>Бержинская Л.П., Иванова Н.В.</b> (ИЗК СО РАН, ИРНИТУ), Левина Е.А., Ружич В.В. (ИЗК СО РАН) Перспективы развития Иркутской агломерации с позиций сейсмического риска
<b>11:15 online</b>	<b>Радзиминович Н.А.</b> (ИЗК СО РАН, БФ ФИЦ ЕГС РАН), Тубанов Ц.А., Санжиева Д.Б.-Д. (ГИ СО РАН, БФ ФИЦ ЕГС РАН), Смекалин О.П. (ИЗК СО РАН) Сейсмотектоника и сейсмичность в районе Цаганского землетрясения 1862 года с $M = 7.5$ (дельта Селенги, Байкал)
<b>11:30 online</b>	<b>Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П.</b> (ИЗК СО РАН) Выявление особенностей влияния скоростных неоднородностей грунтовых слоев на сейсмические воздействия сильных землетрясений Монголо-Сибирского региона
<b>11:45 online</b>	<b>Лопатин М.Н.</b> (Иркутский государственный университет) Проблема определения расстояния для газгидрогеохимических предвестников
<b>12:00</b>	<b>Кофе</b> (Зимний сад ИКИ РАН)
<b>12:15 online</b>	<b>Герман В.И.</b> (ИЗК СО РАН, Красноярский НИИ геологии и минерального сырья) Влияние выбора метода перевода энергетических классов в магнитуды на оценки сейсмической опасности
<b>12:30</b>	<b>Шебалин П.Н.</b> (ИТПЗ РАН) О моделировании сейсмического режима в задачах оценки сейсмической опасности
<b>12:45</b>	<b>Писаренко В.Ф., Скоркина А.А., Рукавишникова Т.А.</b> (ИТПЗ РАН), Ружич В.В., Левина Е.А. (ИЗК СО РАН) Оценка максимальной возможной магнитуды для Байкальской рифтовой зоны
<b>13:00</b>	<b>Завьялов А.Д.</b> (ИФЗ РАН), Зотов О.Д. (ИФЗ РАН, Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН), Гульельми А.В. (ИФЗ РАН), Клайн Б.И. (Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН) О триадах землетрясений
<b>13:15 online</b>	<b>Юрков А.К., Козлова И.А., Бирюлин С.В.</b> (ИГФ УрО РАН) Отражение сейсмических событий в поле объёмной активности почвенного радона в различных геодинамических условиях
<b>13:30- 14:15</b>	<b>Обед</b>
<b>14:15</b>	<b>Григорян А.Г.</b> (ИФЗ РАН), Баранов А.А. (ИТПЗ РАН) Local variations in the geomagnetic field, helium and radon concentrations in wells as possible medium- and short-term precursors of strong earthquakes using the example of Armenia



14:30	<b>Любушин А.А.</b> (ИФЗ РАН), Родионов Е.А. (ИФЗ РАН, МГРИ) Анализ глобальных корреляций магнитного поля Земли в связи с сильными землетрясениями
14:45	Смирнов В.Б., <b>Петрушов А.А.</b> , Михайлов В.О. (ИФЗ РАН, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова) Об RTL-аномалии сейсмического режима перед землетрясением в Турции 06.02.2023
15:00	<b>Морозов А.Н.</b> (ИФЗ РАН), Асминг В.Э. (КоФ ФИЦ ЕГС РАН) Метод вероятностной локации раннеинструментальных землетрясений на основе макросейсмических и инструментальных данных
15:15	Dokukin P. (People's Friendship University of Russia), Güvenaltin M.A. (Hacettepe University, Turkey), <b>Kaftan V.</b> (GC RAS), Toker M. (Yuzuncu Yil University, Turkey) Synoptic analysis of crustal deformation with an eye on migration of the strongest earthquakes in Eastern Anatolia (Turkey) 2009-2023
15:30	<b>Дзэбоев Б.А.</b> (ГЦ РАН) О необходимости новых подходов к оценке сейсмической опасности
15:45 online	Баранов С.В., Федоров А.В. (КоФ ФИЦ ЕГС РАН), <b>Моторин А.Ю.</b> (КоФ ФИЦ ЕГС РАН, КФ АО «Апатит»), Асминг В.Э., Федоров И.С. (КоФ ФИЦ ЕГС РАН) Макросейсмический эффект природно-техногенного землетрясения 5 марта 2022 года с $ML = 3.7$ в Хибинском массиве
16:00	<b>Кофе</b> (Зимний сад ИКИ РАН)
16:15 online	<b>Ghil M.</b> (École Normale Supérieure, PSL University, Paris) Boolean Delay Equations and Their Application to Experimental Earthquake Prediction
16:45	<b>Родкин М.В.</b> (ИТПЗ РАН) Новый алгоритм прогноза землетрясений – подходы и вопросы
17:00	<b>Гриджина М.С.</b> (ИТПЗ РАН, ППК Роскадастр) Исследование зоны сочленения литосферных плит в пределах о. Сахалин по данным спутниковой геодезии
17:15	<b>Агаян А.С.</b> (ИТПЗ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова), Некрасова А.К. (ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН) Анализ пространственной кластеризации сейсмических событий алгоритмом топологической фильтрации DPS: Камчатка
17:30 online	<b>Новиков В.А.</b> (ОИВТ РАН), Сорокин В.М. (ИЗМИРАН) Электромагнитные триггерные эффекты в системе «ионосфера-атмосфера-литосфера» и их возможное использование для краткосрочного прогноза землетрясений
17:45	<b>Цветков И.А.</b> (ИТПЗ РАН, МИРЭА), Некрасова А.К. (ИТПЗ РАН), Кособоков В.Г. (ИТПЗ РАН, Международная организация по сейсмической безопасности (ISSO), Италия) Эпицентры землетрясений и системы активных разломов
18:00	<b>Подольская Е.С.</b> , Некрасова А.К., Прохорова Т.В., Трубенков А.В., Селюцкая О.В., Горшков А.И., Новикова О.В., Кособоков В.Г. (ИТПЗ РАН) Развитие веб-ГИС-проектов ИТПЗ РАН в 2021–2023 гг.
<b>Сессия 2. Математическая геофизика и методы анализа сейсмических данных</b> <b>Конвинер – А.И. Филиппова</b> (Семинарская №200 ИКИ РАН)	
10:00 online	<b>Радзиминович Я.Б.</b> (ИТПЗ РАН, БФ ФИЦ ЕГС РАН), Новопашина А.В. (Иркутский национальный исследовательский технический университет), Гилева Н.А. (БФ ФИЦ ЕГС РАН), Лухнева О.Ф. (ИЗК СО РАН) Быстринское землетрясение 21.09.2020: новый импульс макросейсмических исследований в Восточной Сибири

<b>10:15 online</b>	<b>Семаков Н.Н.</b> ( <i>ИНГГ СО РАН, НГУ</i> ) О выборе оптимальных параметров для оценки глобальной и региональной дипольности магнитного поля Земли
<b>10:30 online</b>	<b>Novikov R.G.</b> ( <i>IEPT RAS, CMAP, CNRS, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, France</i> ), Hohage T. ( <i>Inst. Numerical and Applied Math., Univ. Göttingen, Germany</i> ), Sivkin V.N. ( <i>CMAP, CNRS, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, France, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University</i> ) Phase retrieval and phaseless inverse scattering with background information
<b>10:45</b>	<b>Мельник Г.Э.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Исследование стабильности платформенных областей на территории Северной Евразии
<b>11:00</b>	<b>Молокова А.П.</b> ( <i>ИТПЗ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова</i> ) Использование метода спектральных отношений к вулканическим землетрясениям Ключевской группы вулканов по данным эксперимента KISS
<b>11:15</b>	<b>Бурлаков И.С.,</b> Фомочкина А.С. ( <i>ИТПЗ РАН, РГУНГ им. И.М. Губкина</i> ), <i>Филиппова А.И.</i> ( <i>ИТПЗ РАН, ИЗМИРАН</i> ) Исследование зависимости пространственно-временной модели очага землетрясения от используемого набора записей
<b>11:30</b>	<b>Ливинский А.И.,</b> Горшков А.И., Новикова О.В. ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Распознавание потенциальных мест локализации рудных месторождений в горно-складчатых областях России на основе геолого-геофизических данных
<b>11:45</b>	<b>Греков Е.М.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Анализ извержения исландского вулкана Бардарбунга 2015 года с точки зрения режима сейсмичности
<b>12:00</b>	<b>Кофе</b> (Зимний сад ИКИ РАН)
<b>12:15 online</b>	<b>Наймарк О.Б.</b> ( <i>Институт механики сплошных сред УрО РАН</i> ) Критическая динамика развития разрушения и автомодельные закономерности сейсмических событий
<b>12:30</b>	<b>Владимирова И.С.</b> ( <i>ИО РАН</i> ) Исследование сейсмических циклов сильнейших землетрясений в зонах субдукции методами спутниковой геодезии
<b>12:45</b>	<b>Индаков Г.С.</b> ( <i>МГУ им. М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН</i> ), Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Матвеев М.А., Морозов Ю.А. ( <i>ИФЗ РАН</i> ) Анализ статистических параметров акустической эмиссии при термическом воздействии на горные породы разного состава и происхождения
<b>13:00</b>	<b>Филиппова А.И.</b> ( <i>ИТПЗ РАН, ИЗМИРАН</i> ), Фомочкина А.С. ( <i>ИТПЗ РАН, РГУНГ им. И.М. Губкина</i> ) Очаговые параметры Турецких землетрясений 6 февраля 2023 года по телесеismicким данным
<b>13:15</b>	<b>Баранов С.В.</b> ( <i>КоФ ФИЦ ЕГС РАН</i> ), Моторин А.Ю. ( <i>КоФ ФИЦ ЕГС РАН, КФ АО «Апатит»</i> ), Жукова С.А. ( <i>КоФ ФИЦ ЕГС РАН, ГИИ КНЦ РАН</i> ), Шебалин П.Н. ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Воздействие обводненности среды на магнитуду сильнейшего афтершока на примере Хибинского массива
<b>13:30- 14:15</b>	<b>Обед</b>
<b>14:15</b>	<b>Гоев А.Г.</b> ( <i>ИДГ РАН</i> ) Новые данные о строении земной коры и верхней мантии Кольского региона методом функций приемника

<b>14:30</b>	<b>Резниченко Р.А.,</b> Гоев А.Г. ( <i>ИДГ РАН</i> ) Результаты применения метода функций приемника для решения задач восстановления глубинного скоростного разреза в районе Авачинской бухты (Камчатка)
<b>14:45</b>	<b>Желиговский В.А.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Об ослаблении нелинейности в адвективных членах у пространственно-аналитических решений уравнений магнитогидродинамики
<b>15:00</b>	<b>Подвигина О.М.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Новый алгоритм решения задач с физическими граничными условиями методом Галеркина
<b>15:15</b>	<b>Толмачев Д.С.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Численное моделирование нелинейного конвективного магнитного динамо во вращающемся плоском слое электропроводной жидкости
<b>15:30</b>	<b>Хасаева Т.Т.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Численное исследование возникновения пространственных инверсий магнитного поля во внешних областях спиральных галактик
<b>15:45 online</b>	<b>Желиговский В.А.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ), <b>Чертовских Р.А.</b> ( <i>Центр Систем и Технологий, Инженерный факультет Университета Порто, Португалия</i> ) Эволюция возмущений блоховского типа пространственно-периодических магнито-гидродинамических состояний
<b>16:00</b>	<b>Кофе</b> (Зимний сад ИКИ РАН)
<b>16:15</b>	<b>Гравиров В.В.</b> ( <i>ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН</i> ), <b>Лиходеев Д.В.</b> ( <i>ИФЗ РАН</i> ), <b>Кислов К.В.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Совершенствование геофизического приборного комплекса, установленного в лаборатории геофизических исследований ИФЗ РАН в дальней штольне БНО
<b>16:30</b>	<b>Кислов К.В.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ), <b>Гравиров В.В.</b> ( <i>ИФЗ РАН</i> ) Наиболее перспективные применения распределенного акустического зондирования (DAS) в российской геофизике
<b>16:45 online</b>	<b>Чугаев А.В.,</b> Тезиков А.Д. ( <i>ГИ УрО РАН</i> ), <b>Симикин Д.Е.</b> ( <i>ООО «ПетроФайбер»</i> ) Количественная оценка чувствительности оптоволоконных распределенных датчиков на основании данных межскважинного просвечивания
<b>17:00</b>	<b>Гравиров В.В.</b> ( <i>ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН</i> ), <b>Кислов К.В.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Распределенное акустическое зондирование (DAS): на пути к стандартизации
<b>17:15</b>	<b>Спиридонов Е.П.,</b> Старовойт Ю.О., Бенгальский Д.М., Трещиков В.Н. ( <i>ООО «Т8 Сенсор»</i> ), <b>Никитин С.П.</b> ( <i>ООО «Т8 Сенсор», ООО «Фемтовижн»</i> ), <b>Наний О.Е.</b> ( <i>ООО «Т8 Сенсор», МГУ им. М.В. Ломоносова</i> ), <b>Кислов К.В.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) Предварительные результаты анализа сигналов, зарегистрированных распределенным акустическим сенсором в рамках международного эксперимента Global DAS Month
<b>17:30</b>	<b>Горшков Б.Г.</b> ( <i>ИОФ РАН</i> ), <b>Ильинский Д.А.</b> ( <i>ИО РАН</i> ), <b>Симикин Д.Е.,</b> <b>Таранов М.А.</b> ( <i>ООО «ПетроФайбер»</i> ) Регистрация землетрясений распределенным акустическим датчиком (DAS), размещенным на мелководье Черного моря
<b>17:45</b>	<b>Дмитриенко М.В.</b> ( <i>ООО «СЕКЬЮТЕЛ»</i> ), <b>Кислов К.В.</b> ( <i>ИТПЗ РАН</i> ) О перспективах применения в геофизике существующих систем мониторинга протяженных объектов
<b>18:15</b>	<b>Дружественный фуршет</b> (Музей ИКИ РАН)

Научное издание

III Всероссийская научная конференция с международным участием  
Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений,  
посвященная памяти чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Александра Анатольевича Соловьева  
ИТПЗ РАН, 25-26 октября 2023 г., Москва, Россия

Материалы докладов и программа конференции

Ответственные редакторы:

к.ф.-м.н. А.П. Кержаев, к.ф.-м.н. А.И. Филиппова

Компьютерная верстка:

Л.А. Бутова, О.А. Мациевская, Т.В. Прохорова

Дизайн обложки:

П.Д. Щепалина

Оригинал-макет подготовлен в ИТПЗ РАН  
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

Москва-2023