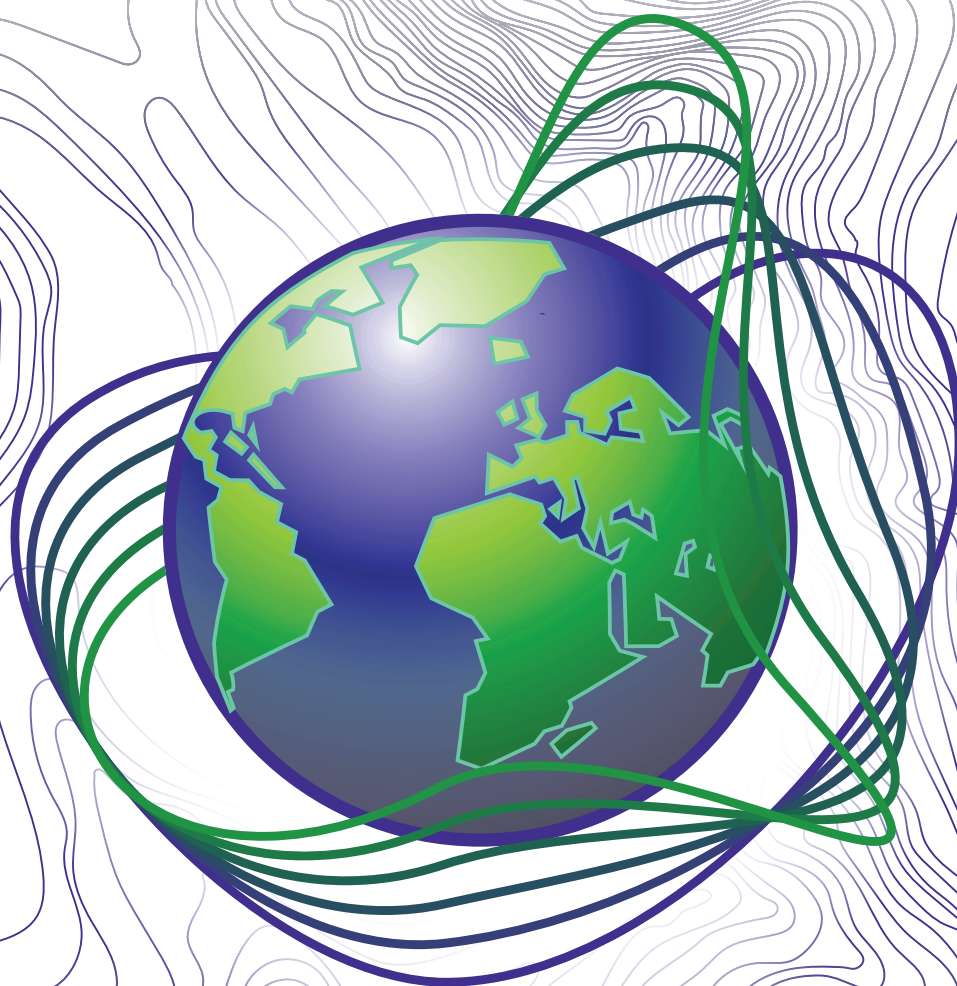


**Институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики
Российской академии наук**

**IV Всероссийская
научная конференция**

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ
ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ
ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗА
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

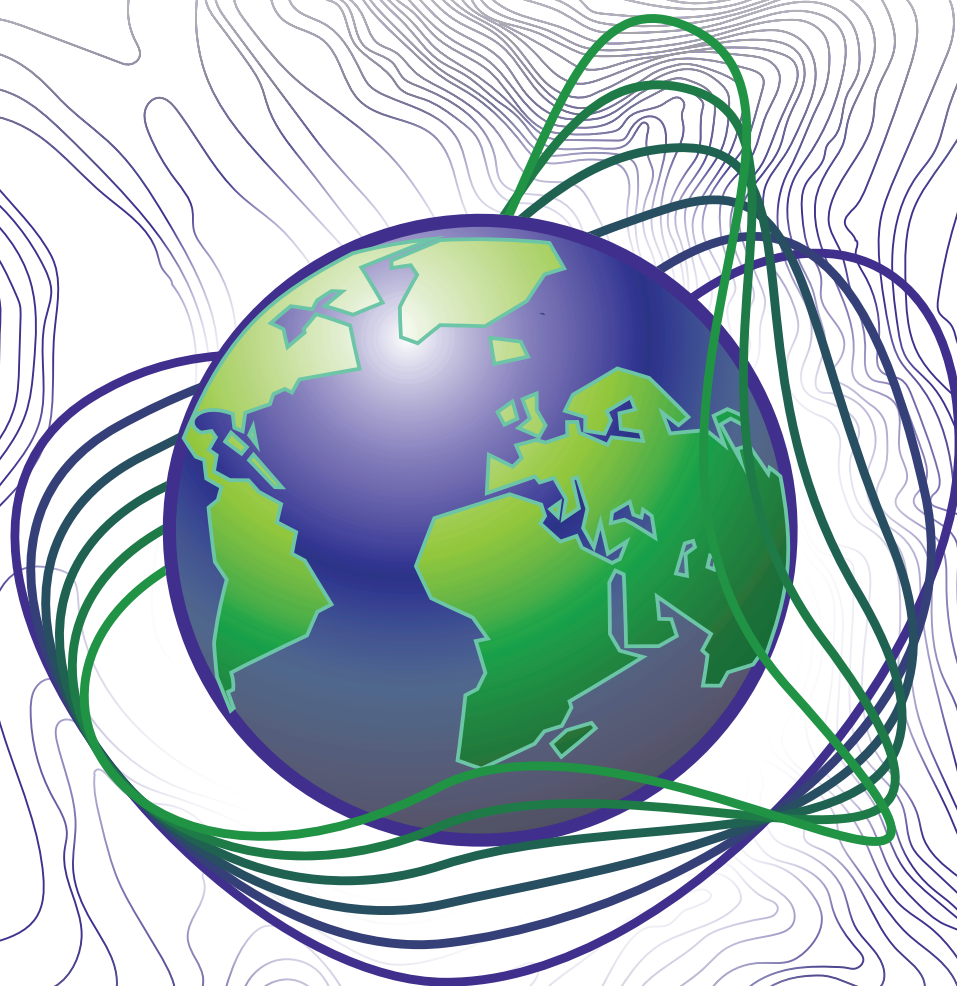


22–23 октября 2025, Москва

**Institute of Earthquake Prediction Theory
and Mathematical Geophysics
Russian academy of sciences**

**IV All-Russian
Scientific Conference**

**MODERN METHODS
OF SEISMIC HAZARD ASSESSMENT
AND EARTHQUAKES PREDICTION**



22–23 October 2025, Moscow

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

Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений

**Материалы докладов и программа
IV Всероссийской научной конференции
22–23 октября 2025 г., Москва, Россия**

**Москва
2025**

Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). – М.: ИТПЗ РАН, 2025. – 199 с.

В сборнике публикуются материалы IV Всероссийской конференции «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», которая состоялась 22–23 октября 2025 г. в Институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва. 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. Особое внимание было уделено результатам исследований Камчатского землетрясения 29 июля 2025 г. с М8.8.

Ответственные редакторы:

к.ф.-м.н. И.С. Владимирова, к.ф.-м.н. А.И. Филиппова

Компьютерная верстка:

О.А. Мациевская, Т.В. Прохорова

Дизайн обложки:

А.П. Молокова

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель: чл.-корр. РАН Шебалин П.Н., д.ф.-м.н., директор Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

Члены комитета:

акад. РАН Лобковский Л.И. (ИО РАН, ИТПЗ РАН)
чл.-корр. РАН Собисевич А.Л. (ИФЗ РАН)
чл.-корр. РАН Соловьев А.А. (ГЦ РАН)
д.ф.-м.н. Горшков А.И. (ИТПЗ РАН)
д.т.н. Морозов А.Н. (ИФЗ РАН)
д.ф.-м.н. Пономарев А.В. (ИФЗ РАН)
д.ф.-м.н. Смирнов В.Б. (ИФЗ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова)
д.ф.-м.н. Стеблов Г.М. (ИТПЗ РАН)
к.ф.-м.н. Владимирова И.С. (ИО РАН, ИТПЗ РАН)
к.ф.-м.н. Гоев А.Г. (ИДГ РАН)
к.ф.-м.н. Кержаев А.П. (ИТПЗ РАН)
к.ф.-м.н. Скоркина А.А. (ИТПЗ РАН)
к.ф.-м.н. Филиппова А.И. (ИЗМИРАН, ИТПЗ РАН)
к.т.н. Фомочкина А.С. (ИТПЗ РАН, Губкинский университет)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Ливинский А.И., Селюцкая О.В., Прохорова Т.В., Тимофеева В.А., Трубенков А.В.,
Щепалина П.Д., Мациевская О.А., Молокова А.П., Крушельницкий К.В.

СОДЕРЖАНИЕ

Алёшин И.М. Петрофизика приповерхностных пород, выведенная из приёмных функций	9
Алёшина Е.И., Карпенко Л.И., Курткин С.В., Габдрахманова Ю.В. Омолонские землетрясения 2021–2023 гг.: новые данные о сейсмичности Северо-Востока России	10
Андреева Н.В., Баранов А.А. Сейсмичность Антарктиды и Южного океана	12
Ашкар Г.Х., Харасов Д.Р., Спиридонов Е.П. Способы агрегации данных DAS для повышения устойчивости результатов.....	14
Баранов А.А., Лобковский Л.И., Чуваев А.В., Бобров А.М. Численная модель современной Земли – моделирование плитной тектоники для Северной Евразии.....	17
Белов М.В., Симикин Д.Е., Потемка А.К., Токарев М.Ю., Горшков Б.Г. Регистрация микросейсмических событий с использованием ПАК «FORseis» на базе распределенного акустического зондирования	19
Бергаль-Кувикас О.В., Павлова В.Ю., Акбашев Р.Р., Макаров Е.О. Приуроченность шлакового конуса на Халактырском пляже к разрывным нарушениям в Малко-Петропавловской зоне поперечных дислокаций (Центральная Камчатка)	21
Бобров А.М., Лобковский Л.И., Баранов А.А. Строение мантии: анализ сечений трехмерной численной модели.....	23
Богомоллов Л.М., Сычев В.Н. Динамические параметры очагов землетрясений, произошедших на острове Сахалин в 1978–2024 гг.	25
Брикова С.А., Гридчина М.С., Басманов А.В. Геодинамический мониторинг Байкальской рифтовой зоны.....	26
Вдовин В.С., Рублев А.С. Оценка смещений станций ГНСС в зоне землетрясений на Камчатке 30.07.2025 и 19.09.2025	28
Виноградов Ю.А., Китов И.О., Санина И.А., Соколова И.Н. Сейсмическая эмиссия на испытательном полигоне Пхунгери в КНДР продолжается в 2025 году.....	32
Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В., Цуканова Е.С., Медведев И.П., Сдельникова И.А., Титков Н.Н. Моделирование очага Камчатского землетрясения 30 июля 2025 г. и связанного с ним цунами	34
Гаврилов В.А., Полтавцева Е.В., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Сагарьяров И.А., Федористов О.В. Многолетний комплексный геофизический мониторинг процессов подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива (Камчатка). Опыт средне- и краткосрочного прогнозирования сейсмической опасности	36
Герман В.И. Оценка занижения сейсмической опасности вследствие игнорирования погрешностей макросейсмических уравнений	38
Гитис В.Г., Дерендяев А.Б. Систематический прогноз землетрясений Камчатки	41
Гоев А.Г., Резниченко Р.А. Новая широкополосная сейсмическая сеть на Восточно-Европейской платформе	43

Гоев А.Г., Филиппова А.И., Орешин С.И. Скоростное строение земной коры и верхней мантии под восточной частью Хараулахтского сегмента Верхоянской сейсмостектонической зоны по данным функций приемника и поверхностных волн.....	45
Гравиров В.В. Достоинства и недостатки виртуальных геофизических приборов, базирующихся на технологии распределенного акустического зондирования, по сравнению с классическими сейсмическими приборами.....	47
Гравиров В.В. Отдельные вопросы разработки многоканальной прецизионной температурной антенны.....	49
Гравиров В.В., Кислов К.В. Выбор наилучшего способа прецизионных измерений температуры горной породы	51
Гравиров В.В., Першин С.М. Влияние сильных турецких землетрясений 2023 года на температурно-флюидный режим в штольне Баксанской нейтринной обсерватории	53
Греков Е.М. Анализ группирования землетрясений в процессе интрузий перед извержениями вулканов Августина и Редаут	55
Григорян А.Г., Канониди К.Х. К вопросу о выявлении аномалий электромагнитной индукции в земной коре и их возможная связь с подготовкой сильных землетрясений.....	57
Гридчина М.С., Стеблов Г.М. Активные разломы Дальнего Востока. Новые данные.....	60
Дергач П.А., Дробчик А.Н., Абраменков С.С. Результаты тестирования широкополосного сейсмометра на основе современных геофонов и цифровой частотной коррекции.....	62
Докукин П.А., Кафтан В.И. Применение синоптических анимаций для прогноза мест сильных землетрясений по данным ГНСС наблюдений	64
Желиговский В.А. Оценка скорости роста палинстрофии в двумерной идеальной гидродинамике: опыт подхода на основе вычислительного эксперимента.....	66
Зарубина А.И., Строгов Т.А., Колесов С.В., Большакова А.В., Носов М.А. Определение области применимости уравнений мелкой воды для численного воспроизведения диспергирующих волн цунами на примере событий Тихоокеанского региона	69
Зинкин Д.В., Пилипенко В.А. Вызывают ли солнечные вспышки и межпланетные ударные волны землетрясения?.....	71
Игнатьев Д.А., Владимирова И.С. Применение машинного обучения для определения геометрии очагов субдукционных землетрясений	72
Кафтан В.И., Мельников А.Ю., Докукин П.А. Оценка опасности возникновения мегаземлетрясения в районе желоба Нанкай (Япония) по данным ГНСС-наблюдений.....	74
Кислов К.В., Гравиров В.В. Какие помехи наиболее опасны для DAS.....	76
Кислов К.В., Марченков А.Ю. Генерация искусственного сейсмического сигнала: подготовка маломощных импульсных источников для сравнительных экспериментов.....	78
Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К. Радоновый мониторинг в краткосрочном прогнозе времени и места землетрясения.....	81

Коновалов А.В., Степнова Ю.А. Эмпирические соотношения между высокочастотным уровнем спектра ускорений, тектоническим типом землетрясения и сейсмическим моментом.....	83
Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Мифы о землетрясениях: Камо грядеши?	84
Кочарян Г.Г., Беседина А.Н., Остапчук А.А. Использование представлений геомеханики разломных зон при решении задач сейсмологии.....	86
Кревсун Д.А., Некрасова А.К., Прохорова Т.В. ГИС-проект для оценки сейсмической опасности на основе Общего закона подобия для землетрясений: Прибайкалье	88
Крылов А.А. Особенности применения инструментальных и расчетных методов при оценке сейсмической опасности морских регионов.....	91
Ливинский А.И., Горшков А.И. Использование параметра фрактальности рельефа в задачах распознавания рудоносных узлов	93
Липеровская Е.В., Родкин М.В. Статистика сейсмоионосферных эффектов в F-области ионосферы для разноглубинных землетрясений: дополнительные данные для интерпретации.....	95
Лобковский Л.И., Баранов А.А., Бобров А.М. 3D модель современной геодинамики и необоснованность представления о стагнации горизонтального участка литосферы у подошвы верхней мантии в зоне субдукции.....	97
Лобковский Л.И., Баранов А.А., Бобров А.М. Современная глобальная геодинамика с позиций 3D-модели конвекции в мантии Земли и ее приложения к региональным тектоническим процессам.....	99
Лобковский Л.И., Гарагаш И.А., Шебалин П.Н., Владимирова И.С. К вопросу об аномально коротком промежутке времени между очагами мегаземлетрясений 30.07.2025 и 05.11.1952 в Курило-Камчатской зоне субдукции	102
Любушин А.А., Родионов Е.А. Влияние солнечных вспышек на выделение сейсмической энергии в Тихоокеанском огненном кольце	106
Мазова Р.Х., Артемьев А.Д., Баранов А.А., Denisov E.F., Van Den Bosch J.F. Катастрофические волны цунами при возможном обрушении фронтального края ледника Туэйтса	108
Михайлов Е.А. Колебания при насыщении роста магнитного поля в теории динамо	110
Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Фёдоров И.С. Сейсмичность восточного сектора Российской Арктики за инструментальный период наблюдений	112
Моторин А.Ю., Баранов С.В. Автоматизированная оценка опасности афтершоков индуцированной сейсмичности Хибинского массива.....	114
Назарова Л.А., Назаров Л.А. Связь техногенной сейсмичности и вариации полей напряжений по данным лабораторных экспериментов и натурных наблюдений.....	116
Некрасова А.К., Горшков А.И., Кособоков В.Г. Синергия независимых методов для мониторинга сейсмического режима	119

Новиков В.А., Лазарева Е.А. Отклик сейсмичности в очаговой зоне сильных землетрясений ($M \geq 7$) Северной Калифорнии на динамические и электромагнитные воздействия как возможный индикатор напряженно-деформированного состояния земной коры	122
Новиков М.А., Крылов А.А. Кластеризация сейсмичности в окрестности Оленекской протоки (дельта р. Лены).....	124
Новикова О.В., Горшков А.И., Семка М.А., Ливинский А.И. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений ($M \geq 6$) на Сахалине	127
Петрушов А.А., Смирнов В.Б. Влияние алгоритмических настроек на оценки параметров сейсмичности.....	129
Подвигина О.М. Устойчивость конвективных валов в горизонтальном слое, вращающемся относительно наклонной оси	133
Подольская Е.С., Некрасова А.К., Прохорова Т.В., Селюцкая О.В., Трубенков А.В. Актуальный российский научный опыт использования веб-геоинформационных систем в сейсмологии.....	135
Пономарёв И.С., Фомиряков Э.А., Харасов Д.Р., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Влияние геометрии кабеля на сигнал DAS в сейсморазведке.....	137
Радзиминович Я.Б., Гилёва Н.А., Филиппова А.И., Мельникова В.И. Хубсугульское землетрясение 11 января 2021 г.: анализ макросейсмических данных.....	140
Родкин М.В. О прогнозе землетрясений на основе комплекса типичных предвестниковых аномалий, текущие результаты, трудности.....	142
Ружич В.В., Левина Е.А. О мультимодельности очагов землетрясений и их прогнозе (на примере Байкальской рифтовой зоны).....	144
Рыжак Е.И., Синюхина С.В. Развитие неустойчивости в аномально стратифицированных вязкоупругих геосистемах: иллюстрация закономерностей на одномерных моделях	146
Семка М.А., Горшков А.И. Потенциальные места сильнейших землетрясений в Тихо-океанском поясе и Зондской дуге.....	148
Сенцов А.А., Агибалов А.О. Формализация метода выделения зон возникновения очагов землетрясений: новый подход и результаты.....	150
Скоркина А.А., Молокова А.П., Чебров Д.В., Шубина И.Ю. Очаговые функции и их спектры для Камчатского землетрясения ($M = 8.8$).....	153
Смирнов В.Б., Черепанцев А.С., Пономарев А.В., Патонин А.В. О связи наклона графика повторяемости и фрактальной размерности в пространствах разной размерности по данным компьютерного и лабораторного моделирования	155
Спиридонов Е.П., Кислов К.В., Харасов Д.Р., Старовойт Ю.О., Трещиков В.Н. Сейсмофотоника: пассивное измерение дисперсии поверхностных волн с помощью DAS «Дунай».....	157

Сычева Н.А. Динамические параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона. Сравнение ДП землетрясений двух сейсмоактивных регионов: Крымско-Черноморский и Северный Тянь-Шань	160
Сычева Н.А., Богомолов Л.М. Распределение сброшенных напряжений в Алтае-Саянском сейсмоактивном регионе	161
Таранюк А.А. Адвекция скалярной примеси двумерным течением с пространственно квазипериодическим полем скорости	162
Толмачев Д.С. Численное моделирование магнитного динамо во вращающейся электропроводной жидкости с наклонной осью	164
Турунтаев С.Б., Рига В.Ю., Зенченко Е.В. Лабораторное и численное моделирование сейсмичности, возникающей при закачке жидкости.....	166
Ушаков Н.А. Адаптивное формирование диаграммы направленности распределенных волоконно-оптических датчиков вибраций, использующих темные волокна	168
Федорова М.Г., Крушельницкий К.В. Возникновение удаленных афтершоков перед сильными землетрясениями	170
Филиппова А.И., Фомочкина А.С. Очаговые параметры сильных Камчатских землетрясений 2025 г. ($M_w > 7.0$) по телесеизмическим данным.....	172
Филиппова А.И., Фомочкина А.С., Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В., Цуканова Е.С., Медведев И.П. Модифицированная методика расчета смещений в очаге для оперативного прогнозирования цунами.....	174
Филиппова А.И., Фомочкина А.С., Кислов К.В., Винберг Ф.Э. Методы определения механизма очага землетрясения по данным DAS: обзор.....	176
Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Сущев С.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Моделирование последствий сценарных землетрясений на примере городов Краснодарского края.....	178
Харасов Д.Р., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Распределённые акустические датчики (DAS) компании Т8 для геофизики и сейсмологии. Примеры применения и методы увеличения дальности работы.....	180
Хасаева Т.Т. Решение спектральной задачи генерации магнитного поля во внешних областях галактики с учетом расширения галактического диска	182
Чебров Д.В. Камчатское мегаземлетрясение 29 июля 2025 г. ($M_w = 8.8$). Предварительные результаты обработки данных региональной системы мониторинга.....	184
Чинкин В.Е., Остапчук А.А. Квази-колмогоровский режим фрагментации массива горных пород в зонах формирования очагов землетрясений.....	185
Шнирман М.Г., Елаева М.С., Блантер Е.М. О способах использования прогноза событий при решении обратных задач	187
Щевьёва Н.С., Владимирова И.С. Эволюция сейсмического процесса в Чилийской зоне субдукции в начале XXI века по данным спутниковых геодезических наблюдений	189
Программа конференции	191

ПЕТРОФИЗИКА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ПОРОД, ВЫВЕДЕННАЯ ИЗ ПРИЁМНЫХ ФУНКЦИЙ

Алёшин И.М.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

E-mail: ima@ifz.ru

(устный доклад)

Низкие сейсмические скорости пород, расположенных непосредственно под дневной поверхностью, как правило, ассоциируются с осадочным чехлом. Однако достаточно часто можно наблюдать приповерхностные слои, сейсмические параметры которых можно считать аномальными, даже по сравнению с осадочными породами.

Природа таких слоёв зачастую весьма различна: нефтяное или газовое месторождение, трещины, в том числе флюидонасыщенные, образованные в результате тектонических процессов и пр. Мощность такого слоя варьируется от нескольких сот метров до 1–3 километров, а упругие параметры слагающих пород имеют экстремальные значения: скорость поперечных волн от 2.5 км/с до 1.5 км/с. То есть нижняя граница слоя и подстилающие породы образуют контрастную границу. При прохождении через неё объёмная P -волна, образованная в результате удалённого землетрясения, порождает мощную, уверенно детектируемую обменную фазу, вступающую непосредственно после прихода исходной волны. Современные технологии обработки сейсмического сигнала и его интерпретации позволяют определить глубину залегания подошвы слоя, а также восстановить его основные упругие параметры (скорость поперечных волн V_s и отношение сейсмических скоростей $q = V_p/V_s$).

Параметры V_s и q являются базовыми входными данными в процедуре петрофизического моделирования. Дополненные геологическими сведениями, они позволяют сделать оценку основных петрофизических свойств: наличие, форма, ориентация трещин, флюидонасыщенность и пр.

В докладе представлены результаты такого рода моделирования для трёх регионов: Карелия, предгорье Северного Кавказа и Западное Оренбуржье.

THE NEARSURFACE ROCK PETROPHYSICS DERIVED FROM RECEIVER FUNCTION

Aleshin I.M.

Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

E-mail: ima@ifz.ru

ОМОЛОНСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2021–2023 ГГ.: НОВЫЕ ДАННЫЕ О СЕЙСМИЧНОСТИ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Алёшина Е.И., Карпенко Л.И., Курткин С.В., Габдрахманова Ю.В.

Магаданский филиал Федерального исследовательского центра «Единая
геофизическая служба РАН», г. Магадан

E-mail: Kurs@memsd.ru

(стендовый доклад)

Объект исследований расположен на востоке Магаданской области, в верхнем течении реки Омолон. Это малонаселенная, но перспективная в горнорудном отношении территория региона. За период инструментальных наблюдений (1963–2020 гг.) зарегистрировано не более 20 событий с $K_p = 7.6–9.9$ и одно землетрясение в 2020 г. с $K_p = 11.1$. В 2021 г. в этом районе проявилась Омолонская зона очагов землетрясений. В течение 2021 и 2023 гг. было локализовано по два сильных землетрясения: Омолонское-I – 9 октября 2021 г. в 06^h54^m с $K_p = 13.3$ ($MPSP = 5.0$, $MS = 4.2$), $h = 12$ км; 19 октября 2021 г. в 04^h48^m с $K_p = 11.6$ ($MPSP = 4.4$), $h = 7$ км [Алёшина, Курткин, 2023]; Омолонское-II – 19 марта 2023 г. в 23^h05^m с $K_p = 13.2$ ($MPSP = 5.0$), $h = 7$ км; 21 марта в 17^h23^m с $K_p = 12.9$ ($MPSP = 5.0$), $h = 5$ км [Алёшина, Курткин, 2025]. Землетрясения сопровождались афтершоками ($N = 61$) с $K_p = 7.1–12.9$. Область эпицентров вытянута в северо-восточном направлении, вдоль р. Омолон, на расстояние ~ 31 км, ширина эпицентральной зоны ~ 8 км. Диапазон глубин афтершоков составил 1–32 км. Область эпицентров главного толчка и афтершоков вытянута в северо-восточном направлении, вдоль течения р. Омолон, на расстояние ~ 17 км. Главный толчок ограничивает положение афтершоков с северо-востока, что характерно для афтершоковых зон землетрясений Северо-Востока [Алёшина и др., 2014]. Макросейсмические данные об Омолонских землетрясениях немногочисленны. Землетрясение Омолонское-I ($K_p = 13.3$) ощущалось в пос. Омсукчан ($\Delta = 166$ км) с интенсивностью $I = 4$ балла. Омолонское-II ($K_p = 13.2$) – на руднике «Кубака» ($\Delta = 85$ км), в пос. Омсукчан ($\Delta = 163$ км) с интенсивностью $I = 4$ балла; в пос. Эвенск ($\Delta = 168$ км) с интенсивностью $I = 3–4$ балла. Ощутимым был и сильнейший афтершок ($K_p = 12.9$) землетрясения Омолонское-II с интенсивностью сотрясений до 4 баллов.

В тектоническом отношении эпицентры сильных землетрясений и их афтершоков находятся в пределах Южно-Омолонского поднятия. Эпицентральной зону пересекает Тебанинский глубинный разлом (левосторонний взбросо-сдвиг) северо-западного простирания [Кузнецов, 2001]. По данным действующей карты ОСР-2015 район исследований находится в 6-балльной зоне при периодах повторения одного шестибалльного сотрясения 1 раз в 500 лет (фрагменты А, В) и восьмибалльного один раз в 5000 лет (фрагмент С).

Расчет интенсивности сотрясений в эпицентре землетрясения Омолонское-I ($h = 12$ км, $MS_{\text{расч.}} = 5.2$) с применением уравнения макросейсмического поля Н.В. Шебалина [Новый..., 1977] соответствует значению $I_0^P = 7.02$ баллов, что выше значений карты ОСР-2015-А и -В. Для Омолонское-II ($h = 4$ км, $MS_{\text{расч.}} = 5.2$) расчётная интенсивность сотрясений в эпицентре соответствует значению $I_0^P = 8.54$ баллов, что выше максимально возможного сотрясения по карте ОСР-2015-С. Следует отметить близость Омолонской зоны к Омсукчанской зоне ВОЗ (возможных очагов землетрясений), где 11 февраля 1987 г. произошло несколько сильных Омсукчанских землетрясений с $K_p = 12.2, 11.8, 12.3$ и глубиной очага $h = 5$ км. Они ощущались в ближайших посёлках: Омсукчан (~60 км), Дукат (~70 км) и Эвенск (~160 км) с силой до 3–4 баллов. Было зарегистрировано 97 афтершоков. В тектоническом отношении эпицентры основного толчка и афтершоков также находятся в пределах Южно-Омолонского поднятия.

Таким образом, произошедшие в 2021 и 2023 гг. сильные Омолонские землетрясения свидетельствуют о существенной сейсмической опасности в исследуемом районе, которая требует учёта в картах сейсмического районирования Магаданской области. Учитывая относительно короткий период наблюдений и мелкофокусный характер сейсмичности региона, нельзя исключать возможность проявления более сильных землетрясений в будущем.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00604-25) и с использованием данных, полученных на УНУ СИЗК МАК (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Литература

- Алёшина Е.И., Курткин С.В. Северо-Восток России и Чукотка // Землетрясения России в 2021 г. Обнинск: ГС РАН, 2023. С. 70–75. EDN: [HQWFMM](#)
- Алёшина Е.И., Курткин С.В. Северо-Восток России и Чукотка // Землетрясения России в 2023 г. Обнинск: ГС РАН, 2025. С. 78–83.
- Алёшина Е.И., Седов Б.М., Гунбина Л.В. Характеристика роев и афтершоков Северо-Востока России // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Девятой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 31–35. EDN: [SWNMOZ](#)
- Кузнецов В.М. Схема тектонического районирования Охотско-Колымского водораздела. Масштаб 1:1 000 000. ФГУП «Магадангеология», 2001.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времён до 1975 г. // Под общей редакцией Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. М.: Наука, 1977. 535 с.

OMOLON EARTHQUAKES OF 2021–2023: NEW INFORMATION ABOUT THE SEISMICITY NORTH-EAST OF RUSSIA

Alyeshina E.I., Karpenko L.I., Kurtkin S.V., Gabdrakhamanova J.V.

Magadan branch of the Geophysical Survey, RAS, Magadan

E-mail: Kurs@memsd.ru

СЕЙСМИЧНОСТЬ АНТАРКТИДЫ И ЮЖНОГО ОКЕАНА

Андреева Н.В.¹, Баранов А.А.²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

E-mail: aabaranov@gmail.com

(устный доклад)

Исследуется сейсмичность Южного полярного региона от Южного полюса до 50-й параллели южной широты. В сейсмоопасных зонах Южного океана: Сандвичевой зоне субдукции, на хребте Маккуори и на Антарктическом срединном хребте – за период наблюдений происходили землетрясения различного генезиса с магнитудой $M > 8$. Эти события вызвали существенные цунами [Roger *et al.*, 2024].

Ни одно из названных событий не привело к гибели людей из-за удаленности от населенных пунктов, уязвимых для землетрясений и цунами. Для хребта Маккуори характерен сдвиговый механизм очага землетрясения, тогда как для района Сандвичевой зоны субдукции получены разные механизмы.

За инструментальный период наблюдений зафиксирована слабая внутриконтинентальная сейсмичность Антарктиды, что опровергает представление об асейсмичности этого континента. Сейсмичность наблюдается на границах тектонических блоков или приурочена к прибрежным районам. В континентальном внутриплитном регионе Антарктиды землетрясения происходят в нескольких обстановках. Тектоническими, вероятно, являются события в Трансантарктических горах и некоторых подледных рифтовых впадинах, а также разрозненные события в центральной части континента. Сейсмичность в прибрежной зоне и на континентальной окраине может быть связана с ледниковой изостатической корректировкой с региональным тектоническим компонентом в некоторых местах. В отдельных районах континента обнаружена вулканическая сейсмичность. Наблюдаемая в Антарктиде сейсмичность низкая по сравнению с другими континентальными внутриплитными регионами (см. рис.). Сильнейшие события внутри континента имеют магнитуду 5–6. Авторами выявлены внутриконтинентальные области повышенной сейсмичности. Показана корреляция внутриконтинентальной сейсмичности с подледными впадинами Восточной Антарктиды. Зарегистрированная сейсмичность подтверждает современную активность рифтов Земли Котса, рифтов Ламберта, Скотта, Денмана, Вандерфорда и Тоттена [Баранов, Андреева, 2025]. Часть событий с магнитудами ниже пороговых не фиксируется. Кроме того, сейсмичность частично подавляется толстым ледяным покровом.

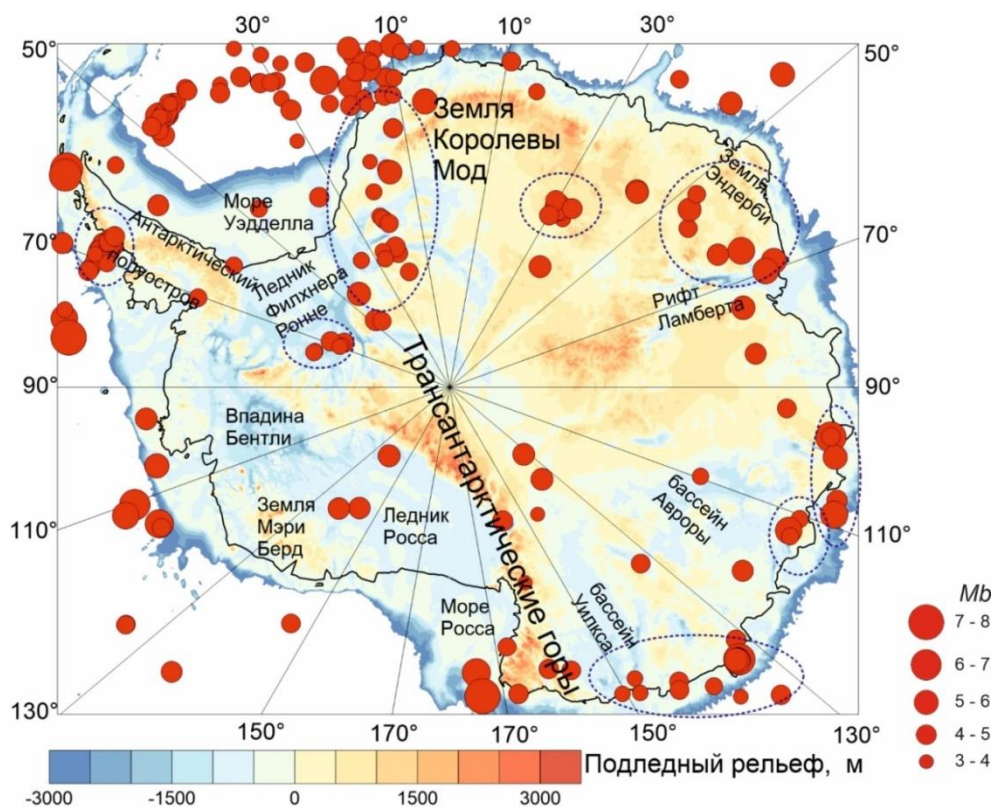


Рис. Карта подледного рельефа BEDMACHINE [Morlighem et al., 2020] с распределением выявленной сейсмичности

Литература

- Баранов А.А., Андреева Н.В. Сейсмичность тектонических структур Южного полярного региона // Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 42–51. EDN: [BGWDAT](#)
- Morlighem M., Rignot E., Binder T., et al. Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet // Nature Geoscience. 2020. V. 13. № 2. P. 132–137. DOI: [10.1038/s41561-019-0510-8](#) EDN: [PLYFGQ](#)
- Roger J.H.M., Jamelot A., Hébert H., et al. The South Sandwich Tsunami of 12 August 2021: An Underestimated Widespread Tsunami Hazard Around the World // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2024. V. 129. № 12. DOI: [10.1029/2024jc021433](#) EDN: [IPZLSF](#)

SEISMICITY OF ANTARCTICA AND THE SOUTHERN OCEAN

Andreeva N.V.¹, Baranov A.A.²

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

² Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

E-mail: aabaranov@gmail.com

СПОСОБЫ АГРЕГАЦИИ ДАННЫХ DAS ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ашкар Г.Х., Харасов Д.Р., Спиридонов Е.П.

ООО Т8, г. Москва

E-mail: ashkar@t8.ru

(устный доклад)

Распределённое акустическое зондирование (Distributed Acoustic Sensing – DAS) – это технология, позволяющая превратить оптоволоконный кабель в набор датчиков, регистрирующих сейсмическую активность. Чаще всего приборы DAS используются вместе с уже существующей кабельной инфраструктурой линий связи, которая изначально не предназначалась для сенсорики. Волокно в таких линиях имеет неплотный контакт со средой, из-за чего данные имеют невысокое отношение сигнал/шум по сравнению с классическими сейсмоприемниками. Для повышения качества сигнала можно применять пространственное суммирование соседних каналов, временную аккумуляцию повторных возбуждений сигнала и другие методы. Межканальное суммирование эффективно подавляет шум, но может привести к нежелательной пространственно-временной фильтрации сигнала.

В работе исследуются различные способы фильтрации (по пространственным каналам и различным волокнам) сигнала DAS для наземной сейсморазведки.

Схема полевого эксперимента показана на рисунке. На профиле длиной 230 м был проложен оптический кабель с несколькими оптическими волокнами, четыре из которых были последовательно сварены на концах линии. Через каждые 10 м кабель закручивался в кольца диаметром ~0.3 м, длина намотки кабеля каждого кольца составляла около 50 м. Всего было сформировано 23 кольца (см. рис.), которые были закопаны на глубину ~0.2 м. На одном конце профиля производились удары импульсным малогабаритным источником «Геотон», расположенным в стороне от профиля на расстоянии 30–50 м. Всего было выполнено 20 накоплений.

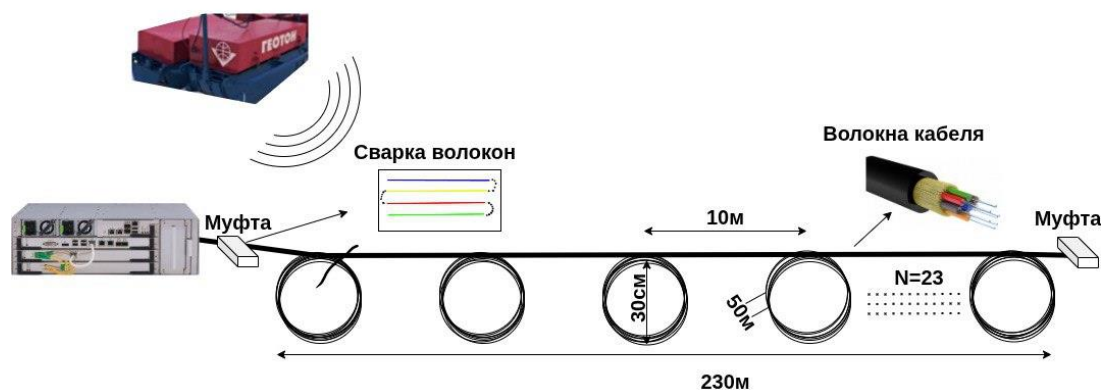


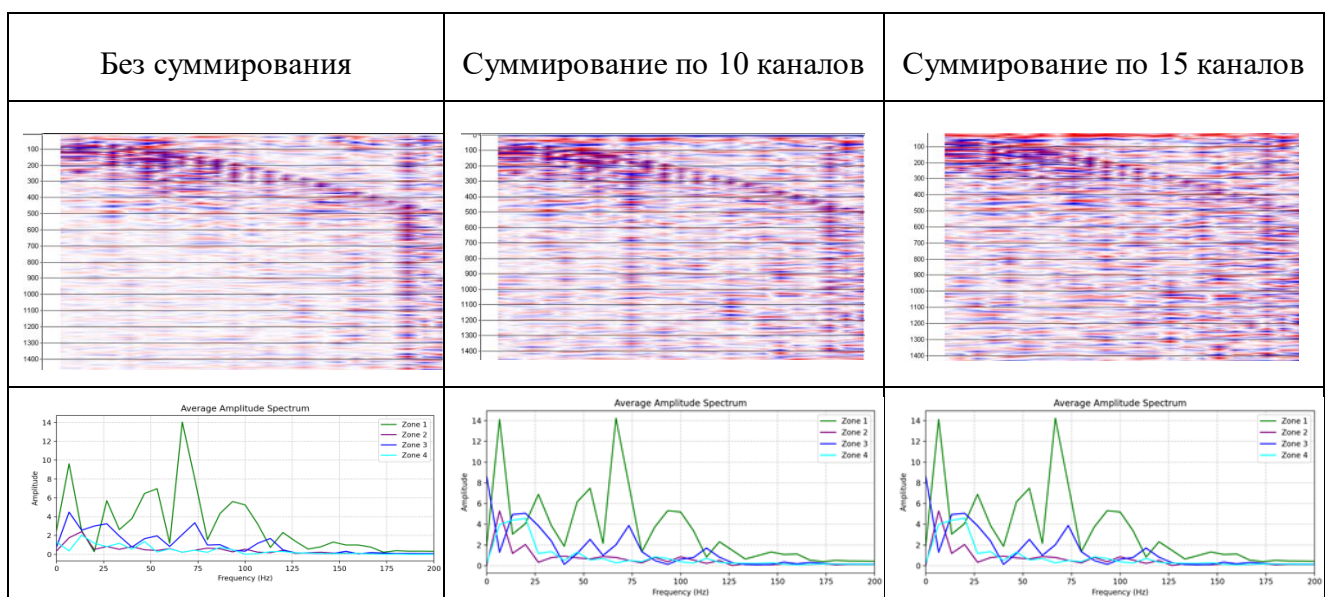
Рис. Схема наблюдения полевого эксперимента

Исследовались следующие методы обработки данных DAS, полученных во время эксперимента:

- Выбор сигналов с одного пространственного канала внутри каждого кольца;
- Суммирование сигналов с нескольких каналов внутри каждого кольца;
- Суммирование сигналов от разных оптических волокон;
- Суммирование сигналов по накоплениям;
- Комбинирование различных методов.

На начальном этапе производилось определение центральных каналов внутри каждого кольца. После этого выполнялось сопоставление шумовых компонент и сигнала при разных вариантах суммирования каналов внутри кольца. Рассматривались варианты суммирования по 5, 10 и 15 каналов слева и справа от центрального канала с вариантом без суммирования (см. табл.). В ходе анализа было определено, что увеличение каналов суммирования повышает амплитуду полезного сигнала, а само изображение сейсмограммы становится более контрастным. Однако при суммировании уже 15 каналов в сигнал, возможно, попадают шумы, приходящие на незакопанные участки кабеля.

Таблица. Сопоставление суммирования каналов



Литература

- Al Hasani M., Drijkoningen G.* Experiences with distributed acoustic sensing using both straight and helically wound fibers in surface-deployed cables – A case history in Groningen, The Netherlands // *Geophysics*. 2023. V. 88. P. B369–B380. DOI: [10.1190/geo2022-0769.1](https://doi.org/10.1190/geo2022-0769.1) EDN: [GKHFDI](https://www.edn.ru/GKHFDI)
- Dou S., Lindsey N., Wagner A.M., et al.* Distributed Acoustic Sensing for Seismic Monitoring of The Near Surface: A Traffic-Noise Interferometry Case Study // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. 11620. DOI: [10.1038/s41598-017-11986-4](https://doi.org/10.1038/s41598-017-11986-4) EDN: [RWQENN](https://www.edn.ru/RWQENN)

Yu Z., Liu Z., Zhan G., Cheng P., Wang B., Fei W. DAS noise attenuation using wavelet stack // Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy. SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2022. P. 592–596. DOI: [10.1190/image2022-3745686.1](https://doi.org/10.1190/image2022-3745686.1) URL: https://www.tgs.com/hubfs/image2022-TGS_DAS_waveletstack.pdf

**WAYS OF DATA AGGREGATION FOR THE IMPROVEMENTS
OF RESULTS STABILITY**

Ashkar G.H., Kharasov D.R., Spiridonov E.P.

LLC T8, Moscow

E-mail: ashkar@t8.ru

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ СОВРЕМЕННОЙ ЗЕМЛИ – МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛИТНОЙ ТЕКТониКИ ДЛЯ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Баранов А.А.^{1,4}, Лобковский Л.И.², Чуваев А.В.³, Бобров А.М.⁴

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

² Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, г. Москва

³ Российский технологический университет (МИРЭА), г. Москва

⁴ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

E-mail: aabaranov@gmail.com

(устный доклад)

Рассматривается численное моделирование глобальных процессов и построение трехмерной модели Земли. На поверхности сферической модели за счет термохимической конвекции вкупе с неньютоновской реологией получена самосогласованная модель современной Земли. Мы моделируем мантию Земли в приближении Буссинеска в трехмерной сферической геометрии. В нашей модели численно решаются безразмерные уравнения сохранения массы вещества и момента импульса. В качестве исходных данных для современной модели Земли авторами используется модель сейсмической томографии SMEAN 2, которая содержит вариации поперечных сейсмических скоростей во всем объеме мантии. Вариации сейсмических скоростей в мантии Δv_s пересчитываются в вариации плотности вещества по соотношению: $\Delta \rho = \text{scaling} \times \Delta v_s$. Для простоты обычно принимают скэйлинг-фактор, зависящий от глубины ступенчато. В модели используется следующий закон вязкости, зависящий от полной температуры и глубины: $\eta(T, r) = A_0 \exp(\gamma T_m(r)/T(r))$, где $T_m(r)$ – температура плавления, $T(r)$ – полная температура, γ – параметр активации, A_0 – размерный коэффициент. Более подробно численное моделирование описано в работе [Чуваев и др., 2020]. На рисунке показаны рассчитанные в модели скорости на поверхности Земли для Евразии и окружающих регионов. Тихоокеанская океаническая плита движется как целое в северо-западном направлении со скоростью несколько сантиметров в год. Евразийская плита в целом движется на восток, причем скорости внутри нее меняют направление, что показывает относительно большую величину деформаций внутри этой плиты. Скорости также существенно меняют направления для северо-восточной Азии (Чукотка и Колымское нагорье) [Лобковский, 2016]. Величины и направления рассчитанных скоростей на поверхности коррелируют с моделью кинематики плит NNR-MORVEL56 [Argus et al., 2011] и с данными космической геодезии для Северной Евразии [Мельник, Стеблов, 2024].

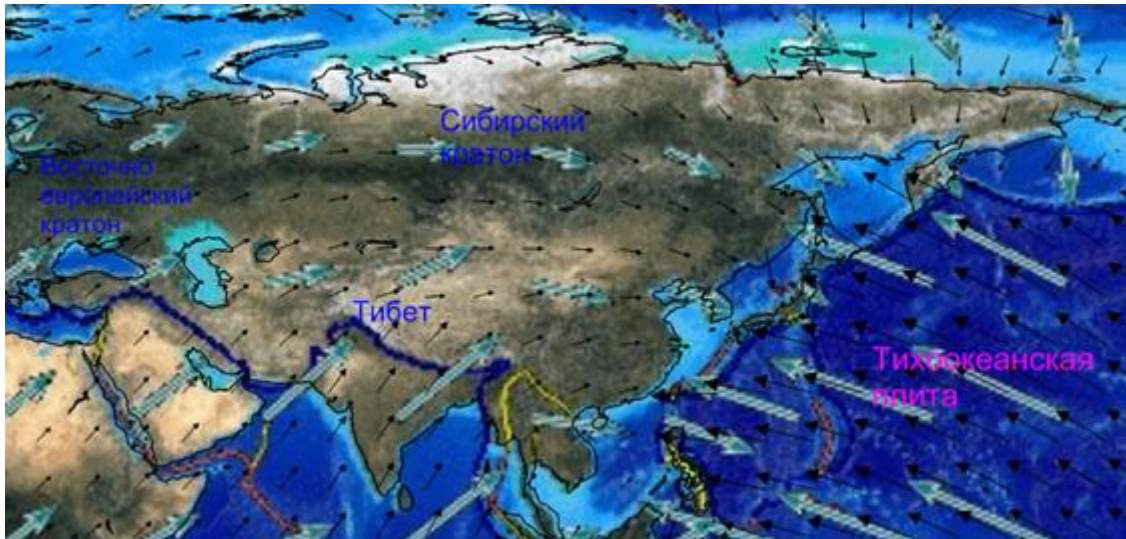


Рис. Векторное поле рассчитанных скоростей на поверхности Земли показано черными стрелками. Голубыми стрелками показаны скорости из модели NNR-MORVEL56 [Argus et al., 2011]. Черной линией показаны контуры континентов

Литература

- Лобковский Л.И. Тектоника деформируемых литосферных плит и модель региональной геодинамики применительно к Арктике и Северо-Восточной Азии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 476–495. DOI: [10.15372/GiG20160302](https://doi.org/10.15372/GiG20160302) EDN: [VPERTX](https://www.edn.ru/vPERTX)
- Мельник Г.Э., Стеблов Г.М. Стабильность Северной Евразии по данным спутниковой геодезии // Физика Земли. 2024. № 2. С. 85–97. DOI: [10.31857/S0002333724020074](https://doi.org/10.31857/S0002333724020074) EDN: [BLQUTJ](https://www.edn.ru/BLQUTJ)
- Чуваев А.В., Баранов А.А., Бобров А.М. Численное моделирование конвекции в мантии Земли с использованием облачных технологий // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 2. С. 103–118. DOI: [10.25743/ICT.2020.25.2.009](https://doi.org/10.25743/ICT.2020.25.2.009) EDN: [AFJPRB](https://www.edn.ru/AFJPRB)
- Argus D.F., Gordon R.G., DeMets C. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2011. V. 12. № 11. Q11001. DOI: [10.1029/2011GC003751](https://doi.org/10.1029/2011GC003751)

NUMERICAL MODEL OF THE MODERN EARTH – SIMULATION OF PLATE TECTONICS FOR NORTHERN EURASIA

Baranov A.A.^{1,4}, Lobkovsky L.I.², Chuvaev A.V.³, Bobrov A.M.⁴

¹ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

² Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow

³ Russian Technological University (MIREA), Moscow

⁴ Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

E-mail: aabaranov@gmail.com

РЕГИСТРАЦИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАК «FORSEIS» НА БАЗЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Белов М.В.¹, Симикин Д.Е.², Потемка А.К.¹, Токарев М.Ю.¹, Горшков Б.Г.²

¹ ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова», г. Москва

² ООО «Петрофайбер», г. Москва

E-mail: info@sc-lmsu.com

(устный доклад)

Волоконно-оптические измерительные системы (ВОИС) зарекомендовали себя в применении к различным сферам, в том числе к различным сценариям приложений наук о Земле. Распределенное акустическое зондирование DAS (distributed acoustic sensing) успешно используется в задачах активной и пассивной сейсморазведки, сейсмологии, мониторинга протяженных объектов, охраны периметра и др. Популярность технологии ВОИС обеспечивается за счет доступного и дешевого чувствительного элемента – оптоволоконного кабеля. Помещенный в скважину или грунт, кабель испытывает те же деформации, что и вмещающая среда. Примечательно, что тот же самый кабель принимает температуру вмещающей среды, которая может быть измерена распределенным температурным датчиком DTS (distributed temperature sensing).

Метод многоканального анализа поверхностных волн широко используется в инженерной сейсморазведке как способ получения разреза скоростей поперечных волн. В мировой практике известны различные способы регистрации поверхностных волн, в том числе пассивной модификацией на темное оптоволокно – резервные коммуникационные линии. Технология ВОИС обеспечивает регистрацию тысяч каналов с шагом до 1 м, а эллипсовидная траектория смещений среды с выраженной горизонтальной компонентой может быть зарегистрирована даже на прямой горизонтально уложенный оптоволоконный кабель. Программно-аппаратный комплекс «FORseis» (fiber optic reflectometry seismic) является полноценной сейсмостанцией на базе DAS, включающий все необходимые компоненты как для классической активной сейсморазведки, так и для пассивного мониторинга. На рисунке изображен фрагмент записи микросейсмических событий, а именно пешего марша вдоль закопанного кабеля. На сейсмограммах четко прослеживаются поверхностные волны с характерной дисперсией скорости распространения, из которых строится разрез поперечных волн.

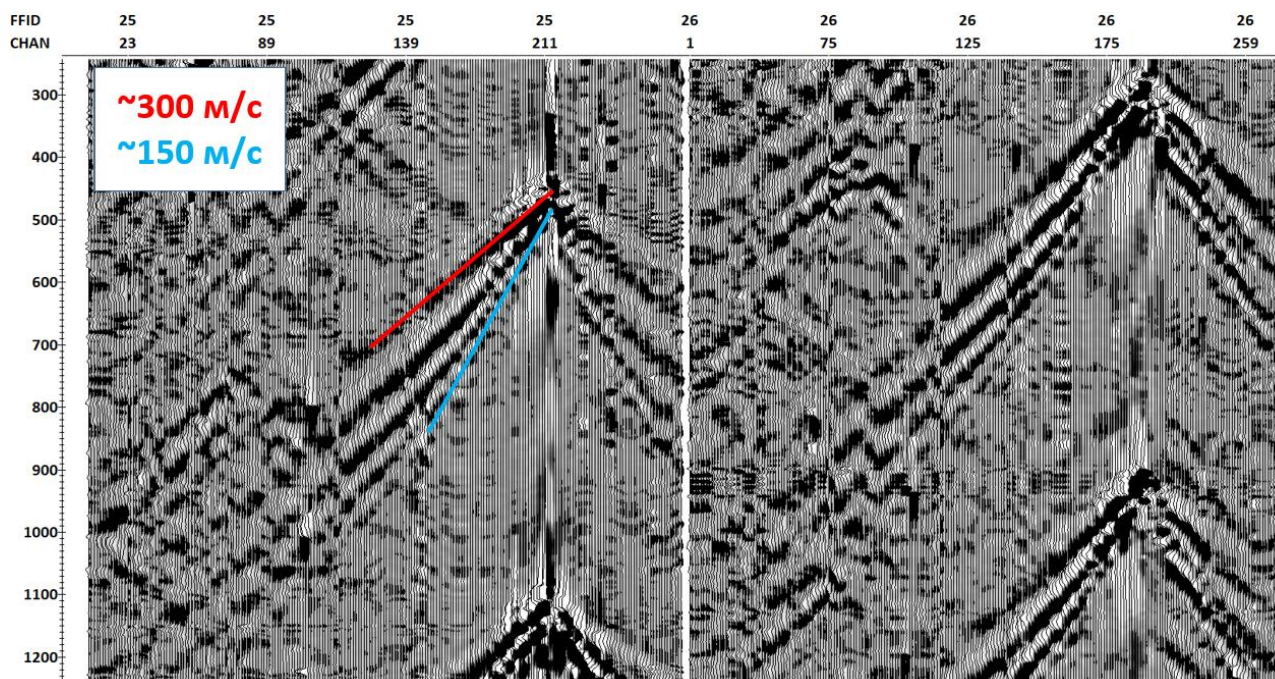


Рис. Сейсмограммы пассивного мониторинга шагов вдоль приемной линии

Литература

- Chang H., Nakata N. Urban site characterization using DAS dark fibers on the MIT campus in Cambridge, Massachusetts // *The Leading Edge*. 2024. V. 43. № 11. P. 747–756. DOI: [10.1190/tle43110747.1](https://doi.org/10.1190/tle43110747.1) EDN: [RJSJCH](#)
- Lellouch A., Biondi B.L. Seismic Applications of Downhole DAS // *Sensors*. 2021. V. 21. 2897. DOI: [10.3390/s21092897](https://doi.org/10.3390/s21092897) EDN: [AUFYXT](#)
- Mateeva A., Lopez J., Potters H. Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with vertical seismic profiling // *Geophysical Prospecting*. 2014. V. 62. P. 679–692. DOI: [10.1111/1365-2478.12116](https://doi.org/10.1111/1365-2478.12116) EDN: [UIFFGR](#)
- Parker T., Shatalin S., Farhadiroushan M. Distributed Acoustic Sensing – a new tool for seismic applications // *First Break*. 2014. V. 32. P. 61–69. DOI: [10.3997/1365-2397.2013034](https://doi.org/10.3997/1365-2397.2013034) EDN: [SSGMHX](#)
- Spikes K., Tisato N., Hess T., Holt J.W. Comparison of Geophone And Surface-Deployed Das Seismic Data // *Geophysics*. 2018. V. 84. № 2. P. 1–21. DOI: [10.1190/geo2018-0528.1](https://doi.org/10.1190/geo2018-0528.1)
- Trafford A., Ellwood R., Wacquier L., et al. Distributed acoustic sensing for active offshore shear wave profiling // *Scientific Reports*. 2022. № 12(9691). P. 987–993. DOI: [10.1038/s41598-022-13962-z](https://doi.org/10.1038/s41598-022-13962-z) EDN: [CGUGPD](#)

MICROSEISMIC MONITORING WITH HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX “FORSEIS” BASED ON DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSING

Belov M.V.¹, Simikin D.E.², Potemka A.K.¹, Tokarev M.Y.¹, Gorshkov B.G.²

¹ LLC “Lomonosov Moscow State University Seismic Data Analysis Center”, Moscow

² LLC “Petrofiber”, Moscow

E-mail: info@sc-lmsu.com

ПРИУРОЧЕННОСТЬ ШЛАКОВОГО КОНУСА НА ХАЛАКТЫРСКОМ ПЛЯЖЕ К РАЗРЫВНЫМ НАРУШЕНИЯМ В МАЛКО-ПЕТРОПАВЛОВСКОЙ ЗОНЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ДИСЛОКАЦИЙ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ КАМЧАТКА)

Бергаль-Кувикас О.В.^{1,2}, Павлова В.Ю.², Акбашев Р.Р.^{2,3}, Макаров Е.О.⁴

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

² *Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, г. Петропавловск-Камчатский*

³ *Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский*

⁴ *Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского, г. Феодосия*

E-mail: kuvikas@mail.ru

(стендовый доклад)

Исследование георадарных методов в активных вулканических зонах, таких как Камчатка, актуально из-за сложности интерпретации данных, обусловленной мощным почвенно-пирокластическим чехлом и погребенными горизонтами. Несмотря на успешное применение георадаров для изучения геологического строения и грунтовых условий на Камчатке, многие аспекты остаются неизученными. Цель работы – выявить разрывные нарушения и причины дегазации на моногенном конусе на Халактырском пляже, используя георадарную и газовую съемку.

Изучаемый конус расположен в Малко-Петропавловской зоне (МПЗ) со сложным геологическим строением, связанным с границей аккреции Кроноцкой палеодуги и долгоживущей системой Южной Камчатки. Регион характеризуется наличием Авачинского трансформного разлома, Авачинского грабена, вулcano-тектонической депрессии и многочисленных разрывных нарушений, к которым приурочены моногенные конусы и гидротермально-магматические системы.

Использовался георадар «ПИТОН-3» (24 МГц) для получения радарограмм и определения геологического строения. Для измерения концентрации CO₂ применялся автономный аппаратный комплекс на базе регистратора ALMEMO с инфракрасным датчиком CO₂ (FYA600CO2H). Подпочвенный воздух отбирался из шпуров глубиной 0.5 м с шагом 50 м.

Радарограммы выявили три основные границы на глубинах 10, 20 и 40 м, соответствующие почвенно-пирокластическому чехлу, пляжным отложениям и различным фациям строения моногенного конуса (шлаки, лавовые потоки). Комплексирование данных газовой и георадарной съемок показало корреляцию повышенных концентраций CO₂ с минимальной мощностью чехла и локальными аномалиями в глубинных слоях, что может указывать на дегазацию разломов. Резкое увеличение CO₂ на 19 пикете коррелирует с областью прохождения электромагнитной волны, свидетельствуя о мощном разрывном нарушении.

В результате проведения комплексных исследований георадарной и газовых съемок было изучено строение верхней части земной коры и пространственное распространение углекислого газа. На основании выраженных осей синфазностей была оценена мощность почвенно-пирокластического чехла и реконструирована палеоповерхность вулканического образования. По локальному распространению проходящей электромагнитной волны, маркирующей трещиноватость или эрозионные процессы плотных лавовых потоков, был определен тип вулканического образования – моногенный шлаковый конус. На основании повышенного значения углекислого газа, совпадающего с локализацией проходящей электромагнитной волны, предположено наличие мощного разрывного нарушения, проходящего на все глубины радарограмм.

Полученные результаты свидетельствуют об активности разрывных нарушений Авачинского грабена МПЗ. Учитывая, что вблизи изучаемого района расположены крупные населенные пункты Камчатки и имеются задокументированные сведения дегазации и треска конуса, следует более внимательно отслеживать изменения сейсмической активности, организовать проведения газового мониторинга и изучать динамику деформаций земной коры.

Исследование частично выполнено в рамках проекта РНФ № 22-77-10019-П, <https://rscf.ru/project/22-77-10019-П/>. Интерпретация данных газовой съемки выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №124030100098-0.

THE ASSOCIATION OF THE CINDER CONE AT KHALAKTYRSKY BEACH WITH FAULTS IN THE MALKO-PETROPAVLOVSK ZONE OF TRANSVERSE DISLOCATIONS (CENTRAL KAMCHATKA)

Bergal-Kuvikas O.V.^{1,2}, Pavlova V.Yu.², Akbashev R.R.^{2,3}, Makarov E.O.⁴

¹ *Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky*

² *Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky*

³ *Kamchatka Branch of the Geophysical Survey, RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky*

⁴ *T.I. Vyazemsky Karadag Scientific Station, Feodosia*

E-mail: kuvikas@mail.ru

СТРОЕНИЕ МАНТИИ: АНАЛИЗ СЕЧЕНИЙ ТРЕХМЕРНОЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Бобров А.М.¹, Лобковский Л.И.², Баранов А.А.^{1,3}

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

E-mail: a_m_bobrov@yahoo.com

(устный доклад)

Кинематика земной поверхности во многом определяется структурой конвекции, идущей в мантии Земли. Мы анализируем результаты трехмерной численной модели глобальной мантийной конвекции, рассчитанной нами ранее [Лобковский и др., 2025]. Расчеты выполнялись на основе томографической модели мантии Земли SMEAN2 с дальнейшим пересчетом аномалий сейсмических скоростей в аномалии плотности и затем – в аномалии температуры. По ним рассчитывались скорости современных мантийных течений.

Для анализа полученной структуры трехмерной глобальной мантийной конвекции рассмотрены сечения сферы разных типов: кольцевые меридиональные сечения мантии; сечения при постоянном радиусе; конические сечения. Рисунок показывает два сечения мантии.

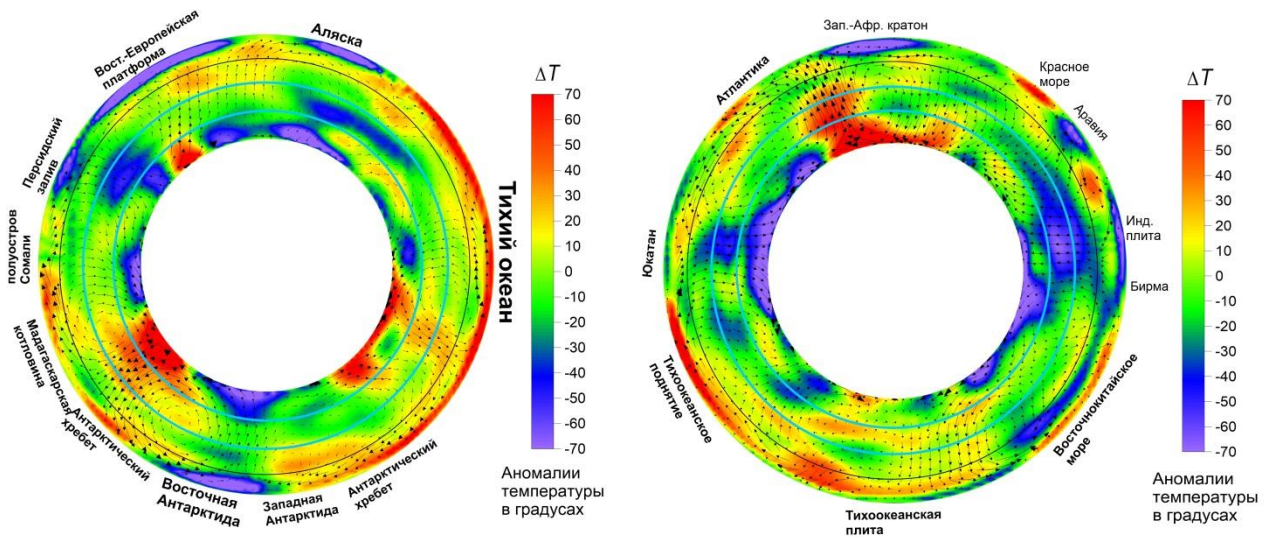


Рис. Меридиональное сечение мантии для 55° в.д. и 235° в.д. (слева) и коническое сечение мантии для 22° с.ш. (справа). Цветом показано поле аномалий температуры в градусах. Поле рассчитанных скоростей представлено черными стрелками. Черной окружностью показана граница между верхней и нижней мантией. Голубые окружности – возможные дополнительные границы в мантии

Также рассмотрены сечения мантии при постоянной широте θ на любой глубине (конические сечения). Поверхность конических сечений имеет радиальное направление, совпадая с направлением силы тяжести.

Построенные сечения показывают отсутствие в ряде регионов мантии единых по всей ее глубине субвертикальных областей горячего или холодного вещества: часто они представляют собой отдельные образования, имеющие выраженное субгоризонтальное положение. Их отличие от субвертикальных форм указывает на существенное стороннее воздействие. Им может быть, в частности, воздействие от течений в смежных сечениях, так как задача является трехмерной. Можно также предположить, что такое воздействие может оказывать наличие некоторых дополнительных границ раздела в мантии, подобно границе между верхней и нижней мантией, но на больших глубинах, наличие которых предполагается в ряде работ [Пуцаровский, Пуцаровский, 2016]. На рисунке две такие возможные границы (две окружности голубого цвета) помещены исходя из выраженных расширений и «шеек» восходящих потоков, а также расположенных горизонтально слэбов холодного вещества. Эти границы соответствуют глубинам приблизительно 1300 км и 2100 км.

В действительности эти границы могут быть размытыми по глубине, представляя собой слои определенной толщины (средняя мантия и зона раздела 2 по [Пуцаровский, Пуцаровский, 2016]).

Работа выполнена частично в рамках госзадания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, частично в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и частично в рамках госзадания Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.

Литература

- Лобковский Л.И., Баранов А.А., Бобров А.М., Чуваев А.В. Термоконвективная трехмерная сферическая модель современной геодинамики Земли: применение в исследовании тектоники и региональной геологии // Геотектоника. 2025. № 1. С. 3–20. DOI: [10.31857/S0016853X25010012](https://doi.org/10.31857/S0016853X25010012) EDN: [DAKPEL](https://www.edn.ru/DAKPEL)
- Пуцаровский Д.Ю., Пуцаровский Ю.М. Новый взгляд на состав и строение глубинных оболочек планет земной группы // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2016. № 1. С. 3–9. EDN: [VVGMYZ](https://www.edn.ru/VVGMYZ)

MANTLE STRUCTURE: ANALYSIS OF CROSS-SECTIONS OF A THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL

Bobrov A.M.¹, Lobkovsky L.I.², Baranov A.A.^{1,3}

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow*

² *Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow*

³ *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow*

E-mail: a_m_bobrov@yahoo.com

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ПРОИЗОШЕДШИХ НА ОСТРОВЕ САХАЛИН В 1978–2024 ГГ.

Богомолов Л.М., Сычев В.Н.

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

E-mail: bleom@mail.ru

(устный доклад)

Получены значения динамических параметров (ДП) для 110 землетрясений на Сахалине с магнитудами $M_w = 4.7–7.7$, произошедших в 1978–2024 гг. Для этих землетрясений ранее был определен скалярный сейсмический момент, проведены оценки радиусов очагов, сброшенных касательных напряжений, приведенной сейсмической энергии. Для оценок ДП использовался феноменологический подход, основанный на наличии регрессии, связывающей радиус очага и значения скалярного сейсмического момента для землетрясений на территории Сахалино-Курильского региона. Результаты работы сведены в таблицу данных. Построены карты распределения усредненных значений этих ДП по площади изучаемого региона. Тем самым значительно увеличен объем данных по сброшенным напряжениям и приведенной сейсмической энергии для сахалинских землетрясений.

DYNAMIC PARAMETERS OF SOURCE-SITES OF THE EARTHQUAKES OCCURRED IN THE SAKHALIN ISLAND IN 1978–2024

Bogomolov L.M., Sychev V.N.

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

E-mail: bleom@mail.ru

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Брикова С.А.^{1,2}, Гридчина М.С.^{1,2}, Басманов А.В.¹

¹ Публично-правовая компания «Роскадастр», г. Москва

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

E-mail: brikovasa@mail.ru

(устный доклад)

В настоящем исследовании проведено сопоставление геодинамического режима по данным спутниковых геодезических наблюдений с локализацией фокальных механизмов землетрясений с $M_w > 4.5$ для южной и центральной котловины озера Байкал.

На пунктах Байкальского геодинамического полигона (ГДП) Росреестра проводятся периодические спутниковые наблюдения с 2011 года [Басманов, 2015]. Рассмотрен период наблюдений продолжительностью 10 лет (2014–2024 гг.), которого достаточно для оценки общих движений пунктов сети и первичной оценки пространственно-временных вариаций этих движений. За каждый годовой промежуток (с июля по июль) с помощью специализированного ПО для прецизионной обработки спутниковых измерений оценены положения пунктов ГДП. Временные ряды, составленные из этих оценок, преобразованы в смещения в системе отсчета с неподвижной Евразийской плитой по модели MORVEL56. В отдельные периоды, в которых зафиксированы землетрясения, наблюдается вариативность направлений смещений по сравнению с периодами со слабой сейсмичностью.

Сейсмические события с $M_w > 4.5$ на рассматриваемой территории происходят с периодичностью около 5 лет. Механизмы очагов землетрясений проанализированы по данным каталога Global CMT [Dziewonski et al., 1981; Ekström et al., 2012] для следующих периодов: 07.2015–07.2016 и 07.2020–07.2021 гг.

Землетрясение 03.02.2016, $M_w = 4.8$ в центральной акватории озера Байкал привело к разнонаправленным движениям на фоне ранее сонаправленных смещений. Механизм очага соответствует сбросу с растяжением на северо-запад и юго-восток.

В период 07.2020–07.2021 гг. произошло четыре крупных землетрясения: два из них вблизи пос. Култук: 21.09.2020, $M_w = 5.5$ и $M_w = 4.8$; вблизи залива Провал 09.12.2020, $M_w = 5.5$ и Хубсугульское землетрясение в Монголии 12.01.2021, $M_w = 6.8$. Годовые смещения пунктов у южной оконечности Байкала соответствуют сдвиговой кинематике сейсморазрывов 21.09.2020. Землетрясение у залива Провал привело к смене режима растяжения на сжатие, сонаправленные смещения пунктов центральной котловины сменились на разнонаправленные, механизм очага сбросовый.

Кроме того, достаточно сильные сейсмические события ($M_w = 4.8$, 5.0 и $M_w = 4.8$) также произошли и в периоды 07.2014–07.2015 и 07.2018–07.2019 гг. западнее юго-западной

оконечности озера Байкал, однако измерения на ГДП не охватывали данную местность в те периоды.

На данный момент сеть претерпела расширение, она охватывает Байкальскую рифтовую зону от пос. Монды на юге до ж/д ст. Кирон на севере. В 2025 году были возобновлены измерения на Северо-Байкальском ГДП [Серебрякова и др., 2010]. Для обеспечения непрерывной фиксации смещений земной поверхности ведутся работы по закладке устойчивых постоянно действующих пунктов, на 2025 год заложено 6 пунктов. Эти работы позволят в дальнейшем более детально изучить движения Байкальской рифтовой зоны.

По имеющимся геодезическим и сейсмологическим данным просматривается согласованность геодинамической обстановки и сейсмического режима исследуемого региона. Таким образом, результаты спутниковых геодезических измерений в комплексе с данными сейсмологических, геофизических, геологических изысканий могут служить основанием для оценки механизмов, магнитуд ожидаемых землетрясений и их локализации.

Исследование выполнено под научным руководством Стеблова Григория Михайловича. Измерения выполнены в рамках ежегодного госзадания для ФГБУ «ЦГКиИПД» и федерального проекта «Национальная система пространственных данных».

Литература

- Басманов А.В. Геодезический мониторинг Байкальского геодинамического полигона Росреестра // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2015. № 2 (30). С. 48–54. EDN: [UJYBPP](#)
- Серебрякова Л.И., Горобец В.П., Сермягин Р.А., Басманов А.В., Буртовой В.В., Ватамановский Э.А., Насретдинов И.Ф., Пикалов О.О., Попадьев В.В., Фролов К.Е. Начальные циклы высокоточных геодезических измерений на экспериментальном Северо-Байкальском геодинамическом полигоне и их результаты // Геодезия и картография. 2010. № 8. С. 11–20. EDN: [SNGVFL](#)
- Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // Journal of Geophysical Research. 1981. V. 86. P. 2825–2852. DOI: [10.1029/JB086iB04p02825](#)
- Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2012. V. 200–201. P. 1–9. DOI: [10.1016/j.pepi.2012.04.002](#)

GEODYNAMIC MONITORING OF THE BAIKAL RIFT ZONE

Brikova S.A.^{1,2}, Gridchina M.S.^{1,2}, Basmanov A.V.¹

¹ Public-law company “Roskadastr”, Moscow

² Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

E-mail: brikovasa@mail.ru

ОЦЕНКА СМЕЩЕНИЙ СТАНЦИЙ ГНСС В ЗОНЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ 30.07.2025 И 19.09.2025

Вдовин В.С., Рублев А.С.

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

E-mail: vdovin@mitp.ru

(стендовый доклад)

Оценка смещений станций ГНСС в зоне землетрясений на Камчатке, произошедших 30.07.2025 и 19.09.2025, была выполнена с использованием специального программного обеспечения ИТПЗ РАН по методике длиннобазисных высокоточных относительных местоопределений относительно пунктов IGS, являвшихся исходными.

На рис. 1 показаны места расположений ближайших к зоне землетрясений пунктов IGS. Расстояния между пунктами IGS и от пунктов IGS до зоны землетрясений являются допустимыми для проведения уравнивания с миллиметровой точностью.

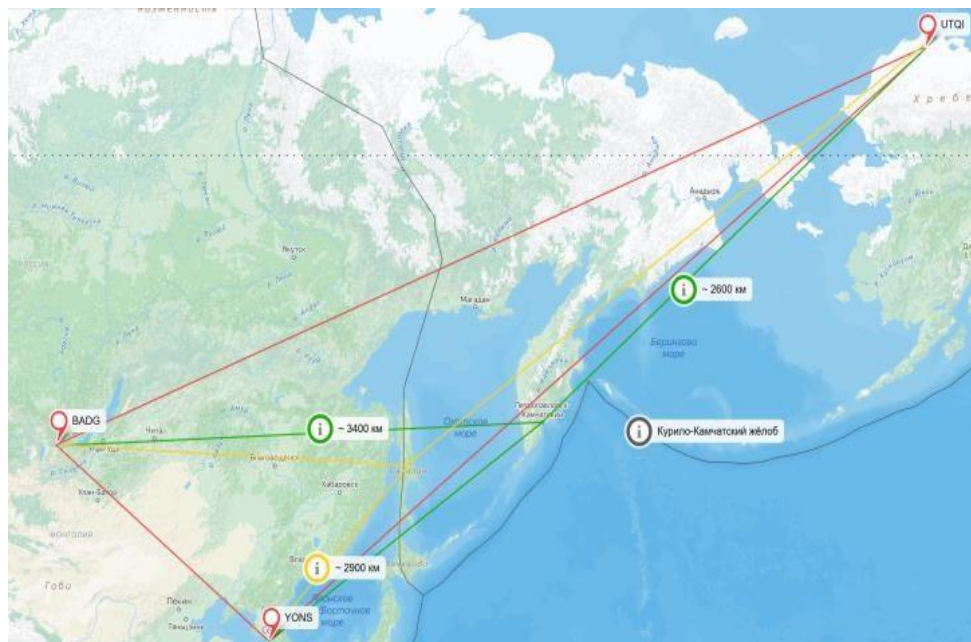


Рис. 1. Места расположений ближайших пунктов IGS

На рис. 2 показаны очаги землетрясений, места расположений станций ГНСС в зоне землетрясений и векторы их косейсмических смещений после землетрясения 30.07.2025 (красными стрелками).

Главным и заранее спланированным результатом были вычисленные косейсмические смещения станций ГНСС, показанные на рис. 2, которые показали, что после землетрясения 30.07.2025 юг Камчатки сместился на юго-восток на расстояние порядка 1 м (две верхние красные стрелки на рис. 2), а максимальное смещение на юго-восток на расстояние порядка 2 м (нижняя красная стрелка на рис. 2) получил о. Парамушир.

По высоте юг Камчатки и о. Парамушир сместились вниз, при этом смещение вниз о. Парамушир (-0.142 м) может свидетельствовать о соответствующих вертикальных смещениях морского дна, способных вызвать цунами.

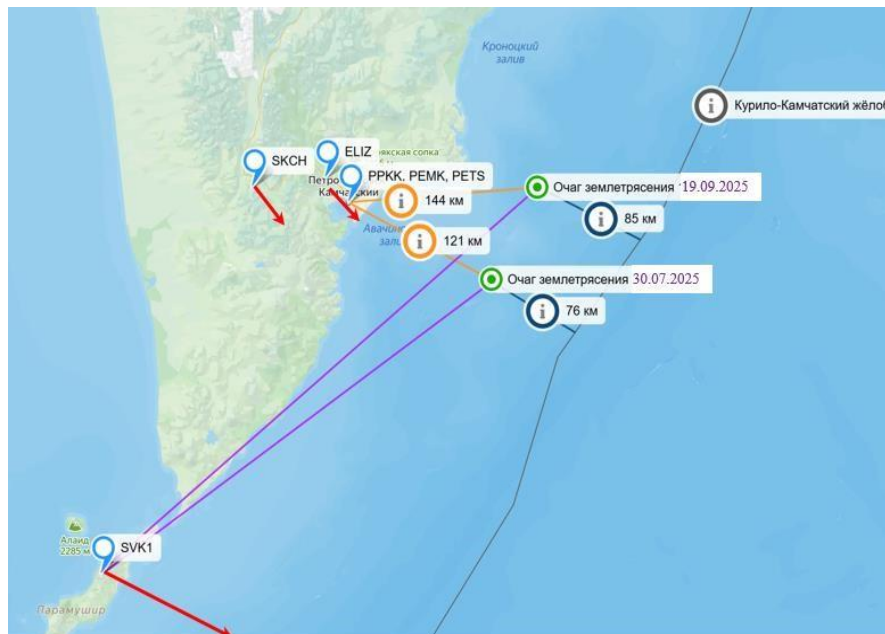


Рис. 2. Очаги землетрясений 30.07.2025 и 19.09.2025, места расположений станций ГНСС в зоне землетрясений и векторы их косейсмических смещений после первого землетрясения (красными стрелками)

После землетрясения 19.09.2025, по нашей оценке, Камчатка не испытала мгновенных смещений ощутимого характера.

Вычисленные ежесуточные постсейсмические смещения станций ГНСС между 01.08.2025 и 17.09.2025 оказались направленными на юго-восток и близкими к линейному тренду с размахом порядка 10 см за период наблюдений и после 19.09.2025 до 27.09.2025 оказались близки к шуму вычислений (~ 1 мм). Смещения по высоте в обоих интервалах наблюдений оказались близкими к шуму. Вычисления подтвердили характерные постсейсмические смещения в зоне землетрясений.

Вычисленные с начала мая по конец июля 2025 г. ежемесячные предсейсмические смещения станций ГНСС с целью убедиться, что до землетрясения 30.07.2025 юг Камчатки и, следовательно, вся Камчатка, согласно направлению субдукции, двигались на северо-запад со скоростью ~ 1 -2 см/год, оказались строго обратными, а именно, с мая по июль 2025 г. юг Камчатки двигался на юго-восток со смещением ~ 1 см/мес. (активно по меркам значений смещений в год).

Вычисленные ежемесячные предсейсмические смещения станций ГНСС ELIZ, PEMK, SKCH в 2024–2025 гг. (рис. 3) показали, что именно между августом и сентябрём 2024 г. произошла перемена направления движения юга Камчатки с северо-запада на юго-восток.

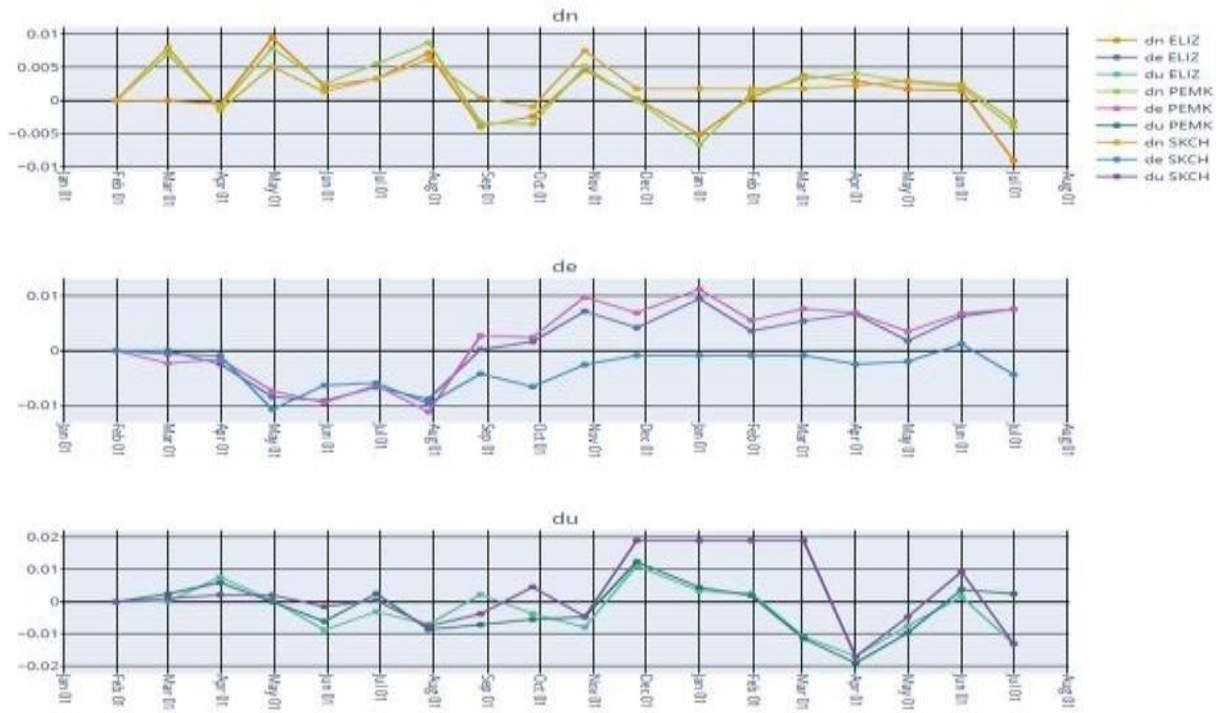


Рис. 3. Ежемесячные смещения станций ГНСС в 2024–2025 гг.

Была выдвинута **Гипотеза 1** о том, что перемена направления движения юга Камчатки с северо-запада на юго-восток ассоциируется по времени с сильным сейсмическим событием. Таким событием могло стать землетрясение на Камчатке магнитудой 7.1, произошедшее 18.08.2024 (по местному времени, UTC+12) в 118 км к юго-востоку от Петропавловска-Камчатского (т.н. Шипунское землетрясение).

Были вычислены ежесуточные смещения станций ГНСС ELIZ, PEMK, SKCH за неделю до и за неделю после Шипунского землетрясения (рис. 4).

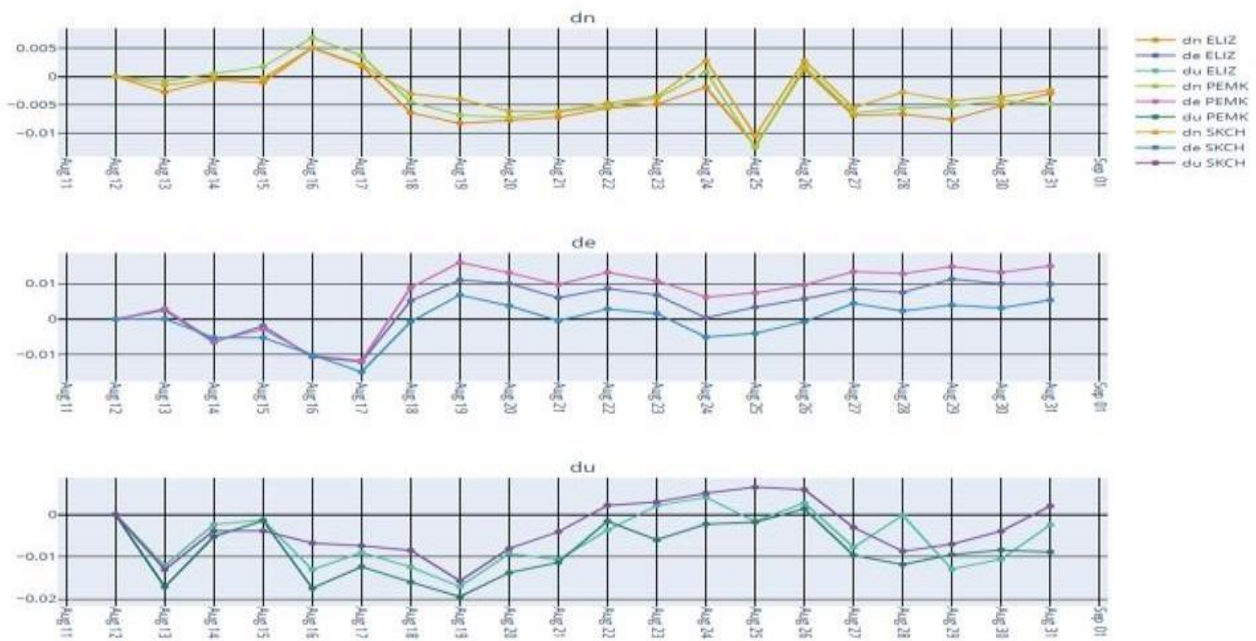


Рис. 4. Ежесуточные смещения станций ГНСС в августе 2024 г.

Результаты вычислений показали, что после Шипунского землетрясения действительно произошла скачкообразная перемена направления движения юга Камчатки с северо-запада на юго-восток, и, таким образом, подтвердили Гипотезу 1.

Гипотеза 2. Перемена направления движения юга Камчатки с северо-запада на юго-восток после Шипунского землетрясения 18.08.2024 связана со срывом сцепления Тихоокеанской и Охотоморской плит, и эту перемену можно считать предвестником очередных сильных землетрясений на Камчатке, включая мегаземлетрясение, произошедшее 30.07.2025.

Проверка Гипотезы 2 потребует выполнить углубленный анализ взаимодействия в период 2024–2025 гг. Тихоокеанской плиты и Охотоморской микроплиты между собой и с верхней мантией, что целесообразно выполнить кооперацией профильных научных учреждений.

ESTIMATION OF DISPLACEMENTS OF PERMANENT GNSS STATIONS IN THE EARTHQUAKE ZONE IN KAMCHATKA ON 07/30/2025 AND 09/19/2025

Vdovin V.S., Rublev A.S.

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

E-mail: vdovin@mitp.ru

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ НА ИСПЫТАТЕЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ ПХУНГЕРИ В КНДР ПРОДОЛЖАЕТСЯ В 2025 ГОДУ

Виноградов Ю.А.¹, Китов И.О.², Санина И.А.², Соколова И.Н.¹

¹Единая геофизическая служба РАН, г. Обнинск

²Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва

E-mail: ikitov@mail.ru

(устный доклад)

Сейсмическая активность после подземного взрыва на полигоне Пхунгери в КНДР в 2017 году периодически усиливалась и ослабевала. Недавний всплеск постсейсмической активности со второй половины 2023 до конца 2024 года был зафиксирован станциями Международной системы мониторинга (МСМ) на региональных и телесеизмических расстояниях. В этот период значительно увеличилось количество событий с относительно высокой магнитудой. Сейсмические группы МСМ в сочетании с новыми методами обработки сигналов позволили снизить порог магнитуды для обнаружения событий как в континентальных, так и в океанических регионах [Kitov, Sanina, 2025]. Применение метода кросс-корреляции волновых форм (ККВФ) на региональных сетях МСМ USRK и KSRS привело к обнаружению 240 сейсмических событий, которые, вероятно, являются афтершоками подземных испытаний, проведенных КНДР [Adushkin et al., 2025]. Используя групповые станции на телесеизмических и региональных расстояниях и критерии определения событий, аналогичные тем, что приняты Международным центром данных (МЦД), на испытательном полигоне было обнаружено 61 из 240 событий. МЦД сообщил об 11 событиях в официальном бюллетене за период с сентября 2017 г. по ноябрь 2024 г. [Адушкин и др., 2025].

В декабре 2024 г. произошло два относительно больших по магнитуде события, которые были обнаружены как стандартными методами МЦД, так и методом ККВФ. В 2025 году на испытательном полигоне Пхунгери методом ККВФ с помощью региональных станций было зафиксировано 11 сейсмических событий, 8 из которых произошли в мае и июне. Самое крупное из этих событий имело относительную магнитуду ~3.1 по региональным данным. В августе 2025 г. было обнаружено одно событие.

Основные параметры афтершоков значительно отличаются от ранее известных оценок, полученных в результате многочисленных подземных взрывов в различных сеймотектонических условиях [Адушкин, Спивак, 1993]. После последнего объявленного взрыва в 2017 году наблюдалась непрерывная последовательность сейсмических событий в постсейсмическом процессе, при этом афтершоки крупнейших взрывов мощностью выше 1 Мт продолжались не более 1–2 лет. Наблюдаемый постсейсмический процесс не

соответствует известному закону Омори. Уникальность афтершоковой последовательности требует наличия высокочувствительной системы регистрации, передовых методов обнаружения сигналов и точных параметров источника для дальнейшего изучения природы и механизмов постсейсмической активности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00106.

Литература

- Адушкин В.В., Китов И.О., Санина И.А.* Обнаружение слабых афтершоков на региональных и телесеismicических расстояниях // Вулканология и сейсмология. 2025. № 5. С. 3–18.
- Адушкин В.В., Спивак А.А.* Геомеханика крупномасштабных взрывов. М.: Недра, 1993. 319 с.
- Adushkin V.V., Kitov I.O., Sanina I.A.* Aftershock emission at the DPRK Punggye-ri test site is continuing // Doklady Earth Sciences. 2025. V. 21. № 2. Article 21. DOI: [10.1134/S1028334X25605759](https://doi.org/10.1134/S1028334X25605759) EDN: [JNGLRF](https://www.edn.ru/ikitov/)
- Kitov I.O., Sanina I.A.* Recovery of the aftershock sequence of the north Atlantic earthquake using waveform cross-correlation // Geodynamics & Tectonophysics. 2025. V. 16. № 4. 0838. <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-4-0838>. DOI: [10.5800/GT-2025-16-4-0838](https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-4-0838) EDN: [ZSEVLX](https://www.edn.ru/zsevlx/)

SEISMIC EMISSION AT THE DPRK PUNGGYE-RI TEST SITE CONTINUES IN 2025

Vinogradov Yu.A.¹, [Kitov I.O.](#)², Sanina I.A.², Sokolova I.N.¹

¹ *Geophysical Survey, RAS, Obninsk*

² *Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, RAS, Moscow*

E-mail: ikitov@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧАГА КАМЧАТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 30 ИЮЛЯ 2025 Г. И СВЯЗАННОГО С НИМ ЦУНАМИ

Владимирова И.С.^{1,2,3}, Габсатаров Ю.В.^{2,3}, Цуканова Е.С.²,
Медведев И.П.², Сдельникова И.А.³, Титков Н.Н.⁴

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³ Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», г. Обнинск

⁴ Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский

E-mail: ir.s.vladimirova@yandex.ru

(устный доклад)

30 июля 2025 г. у побережья Камчатки произошло сильнейшее ($M_W = 8.7$) землетрясение, вызвавшее разрушительное цунами. В работе представлены результаты численного моделирования очага землетрясения и формирования цунами (рис. 1).

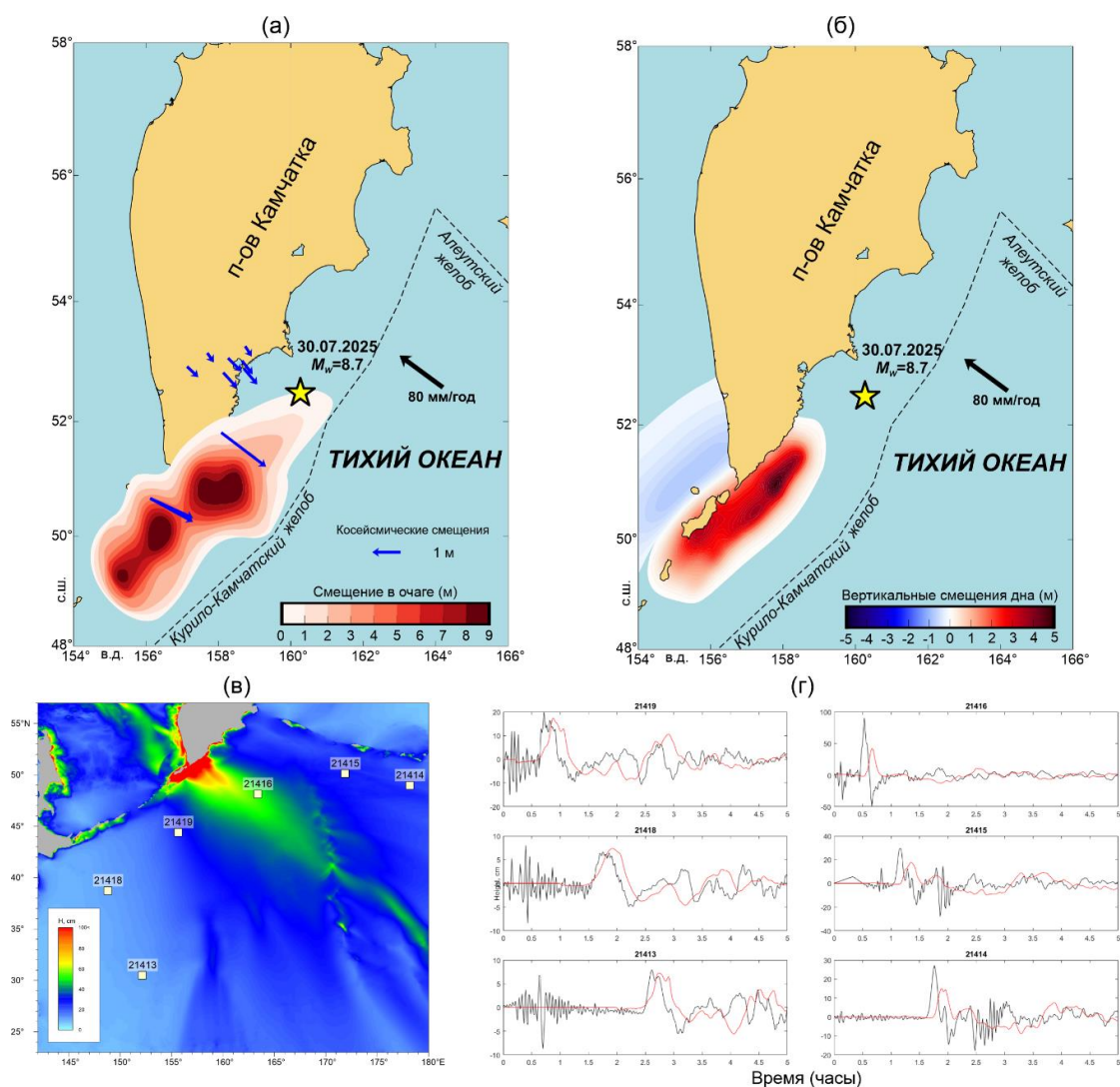


Рис. 1. Результаты моделирования очага Камчатского землетрясения 30 июля 2025 г. и связанного с ним цунами: а) распределённая подвижка в очаге; б) рассчитанные вертикальные смещения морского дна; в) моделирование распространения цунами по акватории Тихого океана; г) сопоставление расчётных и наблюдаемых характеристик волн

Моделирование распределенной подвижки в очаге землетрясения выполнено на основе спутниковых геодезических данных методом конечных элементов в рамках сферически-симметричной слоистой модели Земли [Pollitz, 1996]. На основе восстановленного распределения подвижки в рамках однородной изотропной модели Земли [Okada, 1985] были рассчитаны вертикальные смещения морского дна (рис. 1б), которые в дальнейшем послужили базисом для численного моделирования распространения цунами по акватории Тихого океана (рис. 1в). Как видно из рис. 1г, построенная модель распространения цунами адекватно воспроизводит основные характеристики зарегистрированных волн цунами 30 июля 2025 г.: амплитуды волн, времена прибытия, пространственное распределение энергии.

Для понимания особенностей подготовки Камчатского землетрясения 30 июля 2025 г. выполнено восстановление картины межплитового сцепления по методу обратной подвижки [Savage, 1983], а также проведен анализ пространственно-временных вариаций деформаций земной поверхности в окрестности очага готовящегося землетрясения, рассчитанных с использованием метода Шена [Shen et al., 1996].

Полученные результаты поспособствуют более полному пониманию механизмов подготовки и генерации сильнейших землетрясений и цунами на Камчатке и могут быть использованы для совершенствования систем оперативного предупреждения о цунами.

Литература

- Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the Seismological Society of America. 1985. V. 75. P. 1135–1154. DOI: [10.1785/BSSA0750041135](https://doi.org/10.1785/BSSA0750041135)
- Pollitz F.F. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // Geophysical Journal International. 1996. V. 125. P. 1–14. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x)
- Savage J.C. A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone // Journal of Geophysical Research. 1983. V. 88. № B6. P. 4984–4996. DOI: [10.1029/JB088iB06p04984](https://doi.org/10.1029/JB088iB06p04984)
- Shen Z.-K., Jackson D.D., Ge B.X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements // Journal of Geophysical Research. 1996. V. 101. № B12. P. 27957–27980. DOI: [10.1029/96JB02544](https://doi.org/10.1029/96JB02544)

SOURCE MODELING OF THE KAMCHATKA EARTHQUAKE OF JULY 30, 2025, AND THE ASSOCIATED TSUNAMI

Vladimirova I.S.^{1,2,3}, Gabsatov Y.V.^{2,3}, Tsukanova E.S.²,
Medvedev I.P.², Sdelnikova I.A.³, Titkov N.N.⁴

¹ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

² Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow

³ Geophysical Survey, RAS, Obninsk

⁴ Kamchatka Branch of the Geophysical Survey, RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky

E-mail: ir.s.vladimirova@yandex.ru

МНОГОЛЕТНИЙ КОМПЛЕКСНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНЕ АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА (КАМЧАТКА). ОПЫТ СРЕДНЕ- И КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Гаврилов В.А.^{1,2}, Полтавцева Е.В.^{1,2}, Бусс Ю.Ю.¹,
Морозова Ю.В.¹, Сагарьяров И.А.^{1,2}, Федористов О.В.^{1,2}

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

² *Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга,
г. Петропавловск-Камчатский*

E-mail: kianara@mail.ru

(устный доклад)

На территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона (ППП) более 20 лет непрерывно функционирует Сеть комплексных скважинных измерений, созданная ИВиС ДВО РАН в целях мониторинга процессов подготовки землетрясений, опасных для района Петропавловск-Камчатской агломерации. Сеть обеспечивает мониторинг по семи видам скважинных измерений. Кроме этого привлекаются дополнительные данные, в том числе данные мониторинга полного электронного содержания ионосферы. Данные измерительных пунктов Сети, ежедневно поступающие по каналам телеметрии в лабораторию комплексного мониторинга сейсмоактивных сред ИВиС ДВО РАН, служат основой для регулярных (обычно на каждые две недели) прогнозных заключений о текущей сейсмической опасности. Анализ данных проводится в рамках выбранной базовой физической модели подготовки тектонического землетрясения. В настоящее время в качестве такой модели используется модель консолидации И.П. Добровольского. Наиболее эффективным методом мониторинга процессов подготовки землетрясений, используемым авторами для среднесрочных и краткосрочных оценок текущей сейсмической опасности, в настоящее время является метод мониторинга изменений удельного электрического сопротивления (УЭС) геосреды, базирующийся на данных электромагнитных измерений с подземными электрическими антеннами. На рисунке представлены результаты мониторинга УЭС геосреды для глубины 950 м, полученные за 20 лет непрерывных измерений на территории ППП. Приводимые данные показывают, что все землетрясения с величиной параметра S (процентное отношение длины очага землетрясения к гипоцентральному расстоянию) свыше 23% сопровождались значительными изменениями УЭС геосреды. При этом характер этих изменений согласуется с моделью консолидации. Детальный анализ данных показывает, что сильные камчатские землетрясения в большинстве случаев за несколько месяцев до момента землетрясения предваряются «активной фазой» подготовки землетрясения. Признаком начала активной фазы является почти одновременное появление высокоамплитудных краткосрочных предвестниковых аномалий по различным видам измерений, отвечающих по своему физическому смыслу

выбранной базовой модели подготовки землетрясения. Как показали исследования авторов, согласно модели консолидации, активная фаза подготовки является откликом геосреды на процесс распада жесткой неоднородности. С 2005 года по 28.07.2025 произошло пять сильных камчатских землетрясений, вызвавших в районе Петропавловск-Камчатской агломерации сотрясения до 5–6 баллов (ШСИ-17), и все они предварялись активной фазой. Для четырех из них: Южно-Камчатского (28.02.2013, $M_w = 6.9$), Жупановского (30.01.2016, $M_w = 7.2$), Шипунского (17.08.2024, $M_w = 7.0$) и землетрясения с $M_w = 7.4$, произошедшего в Авачинском заливе 20.07.2025, – были даны успешные краткосрочные прогнозы, в которых прогнозируемые параметры были ограничены оценкой величины S . Как показывает многолетний опыт исследований авторов, в случае, когда главной целью является не точное краткосрочное прогнозирование землетрясений, а качественная («низкая», «повышенная», «значительно повышенная») оценка текущей сейсмической опасности для контролируемого района, требования к параметрам землетрясения могут быть ограничены оценкой величины S .



Рис. Изменения УЭС геосреды перед землетрясениями с глубиной $H \leq 200$ км с величиной $S \geq 18\%$ по данным измерений на ППП с подземной электрической антенной

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России (Госзадание ИВиС ДВО РАН № FWME-2024-0010, Госзадание КамГУ им. Витуса Беринга № 07500035-25-00).

LONG-TERM COMPLEX GEOPHYSICAL MONITORING OF STRONG EARTHQUAKE PREPARATION PROCESSES IN THE AVACHA BAY AREA (KAMCHATKA). EXPERIENCE IN MEDIUM- AND SHORT-TERM SEISMIC HAZARD PREDICTION

Gavrilov V.A.^{1,2}, Poltavtseva E.V.^{1,2}, Buss Yu.Y.¹,
Morozova Yu.V.¹, Sagaryarov I.A.^{1,2}, Fedoristov O.V.^{1,2}

¹ Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky

² Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky

E-mail: kianara@mail.ru

ОЦЕНКА ЗАНИЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ВСЛЕДСТВИЕ ИГНОРИРОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Герман В.И.

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

E-mail: german3v@yandex.ru

(устный доклад)

Широко распространенной причиной недооценки сейсмической опасности является неучет разброса наблюдаемых значений интенсивности вокруг оценочных величин I_0 , получаемых с помощью уравнений макросейсмического поля (УМП).

Известно, что расчетные оценки сейсмической интенсивности I_0 , получаемые по УМП, имеют погрешность ΔI , которую в первом приближении можно считать нормально распределенной с нулевым средним и стандартным отклонением σ . Соответственно, в реальности на площадке объекта в половине случаев мы можем наблюдать интенсивность, большую чем I_0 . Она будет превышать величину $I_0 + \sigma/2$ примерно в 31%, а величину $I_0 + \sigma$ – в 16% случаев. При этом значения σ , как правило, превышают значение в 0.5 балла, а в ряде случаев могут достигать 1 балла [Гусев, Шумилина, 1995].

Важно отметить, что превышения I_0 за счет положительных ΔI имеют значительно большее значение для оценки сейсмической опасности, чем значения меньшие I_0 , т.к. при оценке опасности рассматриваются значения сейсмической интенсивности близкие именно к максимальным значениям. За счет положительных добавок ΔI многочисленные близкие не самые сильные землетрясения с относительно невысокими значениями I_0 могут внести существенный вклад в повышение сейсмической опасности. Как правило, такие землетрясения имеют магнитуду меньше 5.5 и в нормативных моделях ОСР описываются доменами. Игнорирование добавок ΔI часто приводит к занижению оценок сейсмической опасности на 0.4σ – 0.8σ . Ниже приведены подходы к получению количественных оценок таких занижений.

В рамках вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) требуется найти максимальное значение сейсмической интенсивности $I_{\max}(\Delta T_d, P_d)$, которое не будет превышено за нормативный период в $\Delta T_d = 50$ лет, который используется при проектировании, с определенной вероятностью P_d .

Величине $I_{\max}(\Delta T_d, P_d)$ также можно дать математическую интерпретацию. Если J – случайная величина, которая описывает распределение интенсивностей ожидаемых сейсмических воздействий за период ΔT_d , то $I_{\max}(\Delta T_d, P_d)$ – значение величины J , в котором ее функция распределения равна P_d , такую величину также называют квантилем уровня P_d для величины J . Согласно требованиям СП 14.13330 для объектов нормального уровня

ответственности следует брать 90% квантиль (90% квантиль – это значение случайной величины, в котором ее функция распределения равна 0.90), а для повышенной – 95% или 99% квантили. Соответственно практический интерес представляет только правый хвост распределения величины J .

Как было отмечено выше, в качестве J должна использоваться моделируемая величина $J_{(0+\Delta)} = J_0 + \Delta I$, которая описывает реальные интенсивности сотрясений на площадке, учитывая случайную ошибку ΔI и величину J_0 , значения которой рассчитывают по УМП. При рассмотрении J_0 без учета ΔI (как предлагается, например, в СП 286.1325800) получаемые оценки сейсмической опасности будут занижены.

Оценив функцию распределения $F_0(x)$ для J_0 и задав ее для ΔI , можно найти распределение $F_{(0+\Delta)}(x)$ для $J_{(0+\Delta)}$. Параметр σ для задания вида распределения ΔI можно оценить на основе анализа макросейсмических данных. Распределение величины J_0 можно оценить по модельному каталогу землетрясений на период $\Delta T_{dn} = n\Delta T_d$ (обычно $n \geq 10\,000$). Предполагая стационарность сейсмического процесса (независимость распределения J от положения интервала ΔT_d), его также можно рассматривать как n реализаций для периода ΔT_d . По каталогу для каждого i -ого землетрясения вычисляется значение интенсивности $I_0(i)$ для рассматриваемой площадки. Вместе они образуют набор значений $\{I_0(i)\}$ от всех событий каталога. Далее $\{I_0(i)\}$ сортируют в порядке убывания, для отсортированного набора будем использовать индексы k . Каждому значению $I_0(k)$ можно сопоставить вероятность $P(k)$ непревышения значений $I_0(k)$ в течение интервала ΔT_d , которая благодаря упорядоченности $I_0(k)$ будет зависеть от номера k . Значения $P(k)$ определяются по известным закономерностям для простейшего потока событий на основе оценки средних периодов повторения сотрясений $T(k) = k / \Delta T_{dn}$ интенсивностью, не меньшей чем $I_0(k)$, $P(k) = \exp(-\Delta T_d / T(k)) = \exp(-n/k)$. Зависимость $P(I_0)$, где значению $P(k)$ соответствует величина $I_0(k)$, описывает правый хвост эмпирической функции распределения случайной величины J_0 , соответствующей $\{I_0(k)\}$. При этом $I_0(k)$ соответствует квантилю уровня $P(k)$.

Вместе с тем нам необходимо определить распределение правого хвоста $F_{(0+\Delta)}(x)$ для моделируемой величины $J_{(0+\Delta)} = J_0 + \Delta I$, которая описывает реальные интенсивности сотрясений на площадке, учитывая случайную ошибку ΔI . Это можно сделать по методу Монте-Карло. Для этого нужно сгенерировать нормально распределенный набор $\{\Delta I(k)\}$ с дисперсией σ^2 , прибавляя их к набору $\{I_0(k)\}$. Упорядоченные по убыванию значения $\{I_{(0+\Delta)}(k)\} = \{I_0(k)\} + \{\Delta I(k)\}$ будут также иметь вероятности $P(k)$. Зависимость $P(k)$ от $I_{(0+\Delta)}(k)$ будет оценкой эмпирической функции распределения $F_{(0+\Delta)}(x)$ для $J_{(0+\Delta)}$. По ней можно определить соответствующие 90%, 95% и 99% квантили. Определение s таких квантилей для s нормально распределенных наборов $\{\Delta I(k)\}$ с последующим их усреднением позволяет

получить более устойчивые оценки квантилей распределения $F_{(0+\Delta)}(x)$ для $J_{(0+\Delta)}$ (в случае, когда $n = 10\,000$ примерно в 70%, при $s = 1$ ошибки указанных квантилей не превышают 0.05 балла, при $s > 6$ – 0.02 балла, а при $s > 25$ – 0.01 балла). Их следует использовать в качестве искомых оценок сейсмической опасности $I_{\max}(\Delta T_d, P_d)$.

Использование вместо метода Монте-Карло метода прямого интегрирования сейсмических воздействий от всех сейсмических источников также позволяет получить оценку распределения $F_0(x)$ для J_0 . Распределение $F_{(0+\Delta)}(x)$ для $J_{(0+\Delta)}$ в этом случае определяется как свертка распределения $F_0(x)$ с плотностью нормального распределения $N(0, \sigma)$ со средним, равным 0, и дисперсией σ^2 , описывающей распределение добавки ΔI .

При разработке карт ОСП-97/2016 погрешность ΔI для УМП учитывалась. Анализ инструкции к программе PRB-60, использованной для расчета карт ОСП-97, и основных алгоритмов ее программного кода, которые были сохранены в дальнейших ее модификациях (EAST-2003, EAST-2016), показывает, что для случайных добавок ΔI значение σ задавалось равным 0.8. Кроме того, вместе с ΔI применялась еще случайная добавка для магнитуды ΔM [Гусев, Шумилина, 1995], также описываемая нормальным распределением с нулевым средним, но со средним квадратическим отклонением 0.5. Суммарная эффективная добавка $(\Delta I + \Delta M)$ также имеет нормальное распределение с нулевым средним и средним квадратическим отклонением 0.94. Ее учет шел с применением метода Монте-Карло с $s = 1$. Характерные значения повышения сейсмической опасности за счет учета этой добавки составляют 0.4–0.7 балла при использовании 90%, 95% квантилей и 0.7–0.8 балла для 99% квантиля.

Литература

Гусев А.А., Шумилина Л.С. Некоторые вопросы методики общего сейсмического районирования // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии / Отв. ред. В.И. Уломов. М.: ОИФЗ РАН, 1995. Вып. 2/3. С. 289–300.

ASSESSMENT OF THE UNDERESTIMATION OF SEISMIC HAZARD DUE TO IGNORING UNCERTAINTIES IN MACROSEISMIC EQUATIONS

German V.I.

Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk

E-mail: german3v@yandex.ru

СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ

Гитис В.Г., Дерендяев А.Б.

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, г. Москва

E-mail: gitis@iitp.ru, wintsa@gmail.com

(устный доклад)

Систематический прогноз землетрясений выполняется в сейсмически однородной зоне анализа. Прогноз дается регулярно на постоянный временной интервал. Требуется предсказать время (интервал тревоги), место (зона тревоги), магнитуду (магнитудный интервал) целевого землетрясения и вероятность успешности прогноза. Мы считаем прогноз времени землетрясения успешным, если на интервале тревоги эпицентры землетрясений оказываются в зоне анализа, а при пространственно-временном прогнозе все эпицентры данного интервала попадают в зону тревоги. Мерой успешности прогноза являются: (1) U – вероятность обнаружения землетрясений, равная отношению числа интервалов с успешным прогнозом к числу всех интервалов прогноза с эпицентрами в зоне анализа, и (2) P – вероятность того, что на очередном интервале прогноз будет успешным, равная отношению числа успешных прогнозов к числу всех интервалов прогноза.

В ИППИ РАН разработана и апробирована технология систематического прогноза землетрясений по следующей схеме [Gitis, Derendyaev, 2023]. Компьютер в реальном времени обрабатывает разнотипные данные мониторинга и преобразует их в сеточные пространственно-временные поля, машинное обучение выявляет закономерности и осуществляет систематический прогноз землетрясений, эксперты при поддержке аналитических программных средств принимают решение по объявлению тревоги. На первой фазе обучения определяются наиболее информативные поля признаков прогноза и оцениваются их параметры. На каждом шаге реального прогноза выполняется доучивание и прогноз оптимизируется на основе всех имеющихся данных.

Для обучения мы используем метод ортантов. Он обобщает метод минимальной области тревоги [Gitis, Derendyaev, 2025]. Модель метода: (1) Анализируемые процессы адекватно описываются пространственно-временными полями признаков. Значениям полей соответствуют векторы пространства признаков. (2) Возможными предвестниками землетрясений являются векторы, соответствующие всем узлам сетки в предшествующем этому землетрясению цилиндре с центром основания в точке эпицентра. (3) Значения некоторых компонент предвестников целевых землетрясений являются аномально близкими к максимальным или минимальным значениям полей признаков. (4) Каждый возможный предвестник выделяет множество векторов, которые покомпонентно более аномальны, чем сам предвестник. Эти множества называются ортантами с вершинами, которыми являются соответствующие предвестники. Согласно условию (3) естественно считать, что векторы ортантов имеют такие же аномальные свойства, как предвестники, и поэтому они также

являются возможными предвестниками землетрясений. Алгоритм обучения состоит из трех шагов: (1) выбор возможных предвестников землетрясений по их эпицентрам, (2) оценка меры информативности возможных предвестников по их ортантам, (3) оценивание правила прогноза по наиболее информативным предвестникам землетрясений.

Прогноз землетрясений Камчатки выполнялся по двухэтапной схеме: 1-й этап – прогноз интервалов тревоги, 2-й этап – прогноз зон тревоги. Использовались поля в сетке $\Delta x \times \Delta y \times \Delta t = 0.1^\circ \times 0.75^\circ \times 30$ суток, вычисленные по каталогу землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН с 1986 г., с магнитудами $M \geq 3.5$ и глубинами $H \leq 160$ км. Прогнозировались события с $M \geq 6.0$ и $H \leq 60$ км. Тестирование выполнялось с 13.01.2012 до 01.09.2025 с интервалом прогноза 30 суток. Анализировались поля плотности эпицентров землетрясений, их средние магнитуды, произведения плотности на среднюю магнитуду и поля, оценивающие изменения перечисленных полей во времени. При анализе использовались методы локально-ядерного сглаживания, адаптивного весового сглаживания (AWS) [Gitis et al., 2017] и t -статистики Стьюдента. Для прогноза были выбраны поля t -статистик от адаптивно сглаженных полей произведений плотности эпицентров землетрясений на их среднюю магнитуду с параметрами $R = 130$ км и $T = 365$ суток в сочетании с полем произведений плотности эпицентров землетрясений на их среднюю магнитуду с параметрами $R = 60$ км и $T = 100$ суток. Прогноз интервалов тревоги выполнен по трем полям, прогноз зон тревоги – по двум полям.

В докладе будут представлены результаты двухэтапного прогноза интервалов тревоги и зон тревоги, а также пример оценивания вероятности успешного прогноза для одного из землетрясений.

Литература

- Gitis V., Derendyaev A. A Technology for Seismogenic Process Monitoring and Systematic Earthquake Forecasting // Remote Sensing. 2023. V. 15. № 8. 2171. DOI: [10.3390/rs15082171](https://doi.org/10.3390/rs15082171) EDN: [EGWAUH](https://www.edn.net/EGWAUH)
- Gitis V., Derendyaev A. Two-Stage Systematic Forecasting of Earthquakes // Geosciences. 2025. V. 15. № 5. 170. DOI: [10.3390/geosciences15050170](https://doi.org/10.3390/geosciences15050170)
- Gitis V., Derendyaev A., Pirogov S.A., Spokoiny V.G., Yurkov E.F. Earthquake prediction using the fields estimated by an adaptive algorithm // 7th Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics. 2017. P. 1–8. DOI: [10.1145/3102254.3102269](https://doi.org/10.1145/3102254.3102269) EDN: [XNSCDT](https://www.edn.net/XNSCDT)

SYSTEMATIC EARTHQUAKE FORECAST IN KAMCHATKA

Gitis V.G., Derendyaev A.B.

Kharkevich Institute for Information Transmission Problems, RAS, Moscow

E-mail: gitis@iitp.ru, wintsa@gmail.com

НОВАЯ ШИРОКОПОЛОСНАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ СЕТЬ НА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЕ

Гоев А.Г.^{1,2}, Резниченко Р.А.¹

¹ Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

E-mail: goev@idg.ras.ru

(устный доклад)

В последние десятилетия стандартной сейсмологической практикой стало создание разветвленных площадных широкополосных сейсмических сетей [Thybo *et al.*, 2021; Murdie *et al.*, 2024]. Получаемые таким образом данные позволяют решать широкий круг задач – от контроля за сейсмичностью территории до исследований глубинных оболочек Земли. Отдельное внимание уделяется изучению архейско-протерозойских кратонов, в строении которых запечатлена история эволюции планеты [Pearson *et al.*, 2021].

Долгое время на территории ВЕП действовали лишь единичные сейсмические станции. В последние десятилетия, ввиду периодически происходящих на территории ВЕП землетрясений [Gregersen *et al.*, 2007; Kitov *et al.*, 2018; Adushkin *et al.*, 2019], ситуация начала меняться. Получили свое развитие региональные сети в разных частях Европейской части России [Morozov *et al.*, 2020]. При этом основной их целью является контроль за сейсмичностью, что накладывает ограничения как на геометрию расстановки сейсмических станций (установка оборудования в наиболее сейсмоактивных районах ВЕП), так и на выбор датчиков (зачастую это короткопериодные велосиметры). Такой подход препятствовал созданию на территории ВЕП площадной наблюдательной сети.

В последние годы на территории Российской части ВЕП и ее обрамления стартовал проект по созданию новой опорной сейсмической сети, основной целью которой является изучение строения литосферы [Goev *et al.*, 2023; Гоев и др., 2025]. Использование новых данных позволило создать новую модель строения Кольского региона, а также произвести первые локальные оценки кинематических параметров литосферы центральной части ВЕП. Кроме того, на базе новой сети также осуществляется регистрация и локация сейсмических событий на ВЕП и за ее пределами. Продемонстрирована возможность уверенной регистрации сейсмических событий с $ML < 2.0$.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИДГ РАН (№ 125012200561-3).

Литература

Гоев А.Г., Алешин И.М., Константиновская Н.Л., Резниченко Р.А., Юдочкин Н.А., Дробышев М.Н. Новые широкополосные сейсмические станции в центральной части Восточно-Европейской платформы // Физика Земли. 2025. № 3. С. 192–206. DOI: [10.31857/S0002333725030143](https://doi.org/10.31857/S0002333725030143) EDN: [FFYOPG](https://www.edn.ru/FFYOPG)

- Adushkin V.V., Sanina I.A., Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M., Gabsatarova I.P., Konstantinovskaya N.L., Nesterkina M.A. Seismogenic Ancient Structures of the Center and North of the East European Platform // *Doklady Earth Sciences*. 2019. V. 489. P. 1432–1435. DOI: [10.1134/S1028334X19120018](https://doi.org/10.1134/S1028334X19120018) EDN: [SSXQYE](#)
- Goev A.G., Fedorov A.V., Fedorov I.S., Asming V.E., Aleshin I.M., Yudochkin N.A. The Present State of the Kola Peninsula Broadband Seismic Network // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. V. 23. ES6003. DOI: [10.2205/2023es000872](https://doi.org/10.2205/2023es000872) EDN: [FICDWW](#)
- Gregersen S., Wiejacz P., Dębski W., Domanski B., Assinovskaya B., Guterch B., Mäntyniemi P., Nikulin V.G., Pacesa A., Puura V., Aronov A.G., Aronova T.I., Grünthal G., Husebye E.S., Sliupa S. The exceptional earthquakes in Kaliningrad district, Russia on September 21, 2004 // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2007. V. 164. № 1–2. P. 63–74. DOI: [10.1016/j.pepi.2007.06.005](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2007.06.005) EDN: [LKHTMF](#)
- Kitov I.O., Sanina I.A., Sergeev S.S., Nesterkina M.A., Konstantinovskaya N.L. Detection, estimation of magnitude, and relative location of weak aftershocks using waveform cross-correlation: The earthquake of August 7, 2016, in the town of Mariupol // *Seismic Instruments*. 2018. V. 54. P. 158–174. DOI: [10.3103/S074792391802007X](https://doi.org/10.3103/S074792391802007X)
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Konechnaya Y.V., Zueva I.A., Asming V.E., Noskova N.N., Sharov N.V., Assinovskaya B.A., Panas N.M., Evtugina Z.A. Recent seismicity in northern European Russia // *Journal of Seismology*. 2020. V. 24. P. 37–53. DOI: [10.1007/s10950-019-09883-6](https://doi.org/10.1007/s10950-019-09883-6) EDN: [DWRVFM](#)
- Murdie R.E., Yuan H., O'Donnell J.P., Johnson S.P., Ebrahimi R., Rashidifard M. WA Array: A High-Resolution Passive-Source Seismic Survey to Image the West Australian Lithosphere // *Seismological Research Letters*. 2024. V. 95. № 5. P. 3093–3108. DOI: [10.1785/0220230415](https://doi.org/10.1785/0220230415) EDN: [ZNDEWZ](#)
- Pearson D.G., Scott J.M., Liu J., Schaeffer A., Wang L.H., Hunen J., Szilas K., Chacko T., Kelemen P.B. Deep continental roots and cratons // *Nature*. 2021. V. 596. P. 199–210. DOI: [10.1038/s41586-021-03764-4](https://doi.org/10.1038/s41586-021-03764-4) EDN: [UQEUXN](#)
- Thybo H., Bulut N., Grund M., Mauerberger A., Makushkina A., Artemieva I., Balling N., Gudmundsson O., Maupin V., Ottemøller L., Ritter J., Tilmann F. Scan Array – A Broadband Seismological Experiment in the Baltic Shield // *Seismological Research Letters*. 2021. V. 92. № 5. P. 2811–2823. DOI: [10.1785/0220210015](https://doi.org/10.1785/0220210015) EDN: [UERSOQ](#)

NEW BROADBAND SEISMIC NETWORK ON THE CENTRAL PART OF THE EAST-EUROPEAN PLATFORM

Goev A.G.^{1,2}, Reznichenko R.A.¹

¹ *Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, RAS, Moscow*

² *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow*

E-mail: goev@idg.ras.ru

СКОРОСТНОЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ПОД ВОСТОЧНОЙ ЧАСТЬЮ ХАРАУЛАХТСКОГО СЕГМЕНТА ВЕРХОЯНСКОЙ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ПО ДАННЫМ ФУНКЦИЙ ПРИЕМНИКА И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Гоев А.Г.^{1,2}, Филиппова А.И.^{3,4}, Орешин С.И.²

¹ Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

³ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк

⁴ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

E-mail: goev@idg.ras.ru

(устный доклад)

Несмотря на большой объем проведенных в последнее десятилетие работ, связанных в первую очередь с проектом SIOLA, глубинное строение дельты р. Лены (Якутия) остается малоизученным. Наиболее детально строение мантии в этом районе было рассмотрено в [Vinnik *et al.*, 2017] по записям сейсмической станции Тикси (TIXI) до 2017 г. Однако накопление данных за последующий период времени позволяет построить более обоснованную скоростную модель среды. В нашей работе такая модель получена с использованием методов продольных (PRF) и поперечных (SRF) функций приемника [Винник, 2019] и записей землетрясений в 1995–2024 гг. Для восстановления скоростных разрезов использовалась совместная инверсия PRF и SRF [Алешин, 2021]. Стартовые модели состояли из 13 слоев, свободными параметрами в которых являлись: скорости S -волн, отношение V_P/V_S , а также мощность каждого слоя. Для уточнения абсолютных скоростей были использованы невязки времен пробега от границ зоны фазовых переходов мантии.

Точность определения скоростей в RF-моделях также может быть повышена путем совместной инверсией RF и локальных дисперсионных кривых поверхностных волн, полученных методами поверхностно-волновой томографии (SWT). Несмотря на эффективность такого подхода, при его реализации теряется возможность получения независимых моделей различными методами, согласованность которых на качественном уровне может являться дополнительной верификацией полученных решений. В свете этого, мы решили не объединять RF и SWT в рамках совместной инверсии, а получить независимые результаты обоими методами.

Для построения скоростной модели среды по данным поверхностных волн нами использовалась локальная дисперсионная кривая групповых скоростей волн Рэлея в диапазоне периодов 10–250 с, полученная методом SWT [Яновская, 2015] в районе станции TIXI в работе [Середкина, 2019]. Восстановление скоростного разреза S -волн осуществлялось методом сопряженных градиентов для модели среды с двумя слоями коры с постоянными скоростями и 11 слоями мантии с линейным изменением скорости с глубиной.

В результате было получено, что верхняя часть земной коры под станцией TIXI (до

15 км) характеризуется пониженными относительно модели ak135 значениями скоростей S -волн и более высокими значениями V_P/V_S . На глубинах 15–30 км скорости S -волн приближаются к таковым по ak135, однако V_P/V_S становится пониженным (около 1.6). Кормантийный переход под станцией не имеет четкой границы и представлен переходной зоной с возрастанием скоростей S -волн от ~4.0 до 4.5 км/с. Мощность этой зоны, оцененная независимо по данным RF и SWT, составляет около 30 км. Отметим также мощный подкоровый низкоскоростной переходный слой до глубины около 65–70 км. Особенностью строения верхней мантии под станцией по данным RF является наличие двух слоев с пониженными скоростями и повышенным отношением V_P/V_S в интервалах глубин 80–110 и 140–160 км, которые при этом могут быть представлены как единый слой с двумя локальными минимумами. Отметим, что второй из них выделяется менее надежно, однако его существование частично подтверждается скоростным разрезом, полученным по поверхностным волнам, в котором прослеживается единый слой пониженных скоростей на глубинах 90–180 км. Расхождение в количестве низкоскоростных слоев может быть связано, в первую очередь, с различной разрешающей способностью моделей RF и SWT по горизонтали. Тем не менее, обе модели хорошо согласуются между собой как на качественном уровне, так и в абсолютных значениях скоростей.

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) EDN: [FTODPX](https://www.edn.ru/FTODPX)
- 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) EDN: [BYXDBGY](https://www.edn.ru/BYXDBGY)
- Середкина А.И. Поверхностно-волновая томография Арктики по данным дисперсии групповых скоростей волн Рэлея и Лява // Физика Земли. 2019. № 3. С. 58–70. DOI: [10.31857/S0002-33372019358-70](https://doi.org/10.31857/S0002-33372019358-70) EDN: [QLGUBG](https://www.edn.ru/QLGUBG)
- Яновская Т.Б. Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб.: Наука, 2015. 167 с.
- Vinnik L., Oreshin S., Makeyeva L., Dündar S. Fluid-filled porosity of magmatic underplates from joint inversion of P and S receiver functions // Geophysical Journal International. 2017. V. 209. P. 961–968. DOI: [10.1093/gji/ggx067](https://doi.org/10.1093/gji/ggx067) EDN: [PSAPOZ](https://www.edn.ru/PSAPOZ)

STRUCTURE OF THE CRUST AND UPPER MANTLE UNDER THE EASTERN PART OF THE KHARAULAKH SEGMENT OF THE VERKHOYANSK SEISMOTECTONIC ZONE FROM RECEIVER FUNCTION AND SURFACE WAVE DATA

Goev A.G.^{1,2}, Filippova A.I.^{3,4}, Oreshin S.I.²

¹ Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, RAS, Moscow

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

³ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, RAS, Moscow, Troitsk

⁴ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

E-mail: goev@idg.ras.ru

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ВИРТУАЛЬНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ, БАЗИРУЮЩИХСЯ НА ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, ПО СРАВНЕНИЮ С КЛАССИЧЕСКИМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ

Гравиров В.В.^{1,2}

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

² *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*

E-mail: gravirov@mail.ru

(стендовый доклад)

В последние годы в сфере геофизики наблюдается значительный рост интереса к новым современным технологиям. Этот тренд вызван несколькими факторами. Во-первых, настоятельная необходимость укрепления национального суверенитета и безопасности страны требует внедрения высоких технологий в различные отрасли. Во-вторых, возросшие требования к точности и эффективности мониторинга геологических процессов стали важным аспектом для предотвращения природных катастроф и управления ресурсами. В-третьих, поиск и разведка месторождений стратегического минерального сырья, такого как редкоземельные элементы и металлы, становится все более актуальным в условиях глобальной конкуренции за ресурсы. Наконец, повышение эффективности добычи углеводородов и твердых полезных ископаемых также требует новых подходов и решений.

Одной из наиболее многообещающих технологий, привлекающих внимание научного сообщества, является распределенное акустическое зондирование, или Distributed Acoustic Sensing (DAS). Эта инновационная методика использует оптоволоконные кабели для регистрации акустических волн, что позволяет осуществлять мониторинг геологических и структурных изменений с высокой пространственной разрешающей способностью. Применение DAS открывает новые горизонты для изучения физики Земли, включая анализ землетрясений, мониторинг подземных вод и исследование процессов, происходящих в недрах планеты.

Системы DAS позволяют охватывать большие расстояния, что делает их особенно полезными для мониторинга больших территорий. Например, в нефтяной и газовой промышленности DAS может использоваться для контроля состояния трубопроводов и выявления утечек, что существенно снижает риски аварий и увеличивает безопасность операций. Также технологии DAS находят применение в сейсмологии, позволяя более точно отслеживать сейсмическую активность и предсказывать землетрясения. Таким образом, распределенное акустическое зондирование представляет собой один из ключевых инструментов в современных геофизических исследованиях. Оно не только повышает эффективность работы в области добычи полезных ископаемых, но и способствует более глубокому пониманию процессов, происходящих в недрах Земли. В условиях глобального

изменения климата и растущей необходимости в ресурсах применение подобных технологий становится особенно актуальным и важным для устойчивого развития общества.

Очевидно, что DAS имеет все шансы занять важное место в арсенале геофизических методов, но полное замещение традиционных приборов виртуальными на базе DAS в текущей практике в ближайшее время вряд ли возможно [Гравиров, 2025]. Хотя виртуальные приборы DAS имеют очевидные преимущества, они также сталкиваются с большим комплексом ограничений, которые не позволяют им стать универсальным решением. Скорее всего, именно комбинация технологий может в итоге стать наиболее эффективным подходом. В будущем подобная интеграция технологий может стать ключом к более точным и детализированным данным, что, в свою очередь, положительно сможет повлиять на научные исследования и практические приложения в области геофизики. Важно учитывать, что мир геофизики динамичен, и технологии продолжают развиваться. Слияние традиционных и новаторских методов может создать новые возможности для исследования Земли и ее ресурсов.

В настоящее время виртуальные и традиционные геофизические приборы не смогут полностью заменить друг друга. У каждого из этих типов есть свои достоинства и недостатки, причем недостаток у одного типа приборов оказывается достоинством у другого, т.е. очевидно, что обе технологии доказывают свою жизнеспособность и применимость. Также следует отметить, что в будущем вполне вероятна интеграция виртуальных приборов на базе распределенного акустического зондирования и традиционных геофизических приборов. Комбинация данных, получаемых с помощью этих двух технологий, даст возможность создавать более полные и комплексные модели для анализа геологических и экологических процессов. Использование комбинированного подхода позволит частично устранить ограничения одной технологии, компенсируя их преимуществами другой. Такой симбиоз может существенно повысить качество изучения природы Земли и обеспечить более высокую степень уверенности в научных выводах.

Литература

Гравиров В.В. Смогут ли виртуальные геофизические приборы на базе распределенного акустического зондирования заменить в ближайшем будущем классические сейсмические приборы? // Наука и технологические разработки. 2025. Т. 104. № 1. С. 35–49. DOI: [10.21455/std2025.1-2](https://doi.org/10.21455/std2025.1-2) EDN: [TNXZSC](https://www.edn.ru/TNXZSC)

ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF VIRTUAL GEOPHYSICAL INSTRUMENTS BASED ON DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSING TECHNOLOGY COMPARED TO CLASSICAL SEISMIC INSTRUMENTS

Gravirov V.V.^{1,2}

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

² Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

E-mail: gravirov@mail.ru

ОТДЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПРЕЦИЗИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ АНТЕННЫ

Гравиров В.В.^{1,2}

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

² *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*

E-mail: gravirov@mail.ru

(устный доклад)

В последнее время в Кавказской подземной геофизической лаборатории, расположенной в дальней штольне Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН, был осуществлён значительный объём работ, направленный на дальнейшее совершенствование установленного там геофизического приборного комплекса. Лаборатория находится в сердце горы Андырчи, на расстоянии порядка 25 км от вулкана Эльбрус, что делает её поистине уникальным научным инфраструктурным объектом мирового уровня для проведения геофизических исследований. Приборный комплекс лаборатории отличается не только выдающимися эксплуатационными характеристиками, но и широкими возможностями для комплексного анализа различных геодинамических процессов [Гравиров и др., 2025].

Одним из наиболее актуальных направлений исследований, требующих особого внимания, является изучение температурного режима горных пород в окрестностях вулкана Эльбрус. Этот регион, обладая сложной геологической структурой, представляет интерес для ученых, занимающихся вулканологией и геотермальной энергией. Для решения этой важной задачи была разработана электронная многоканальная прецизионная температурная антенна [Лиходеев и др., 2018], отличающаяся высокой чувствительностью и разрешающей способностью. Антенна позволяет проводить мониторинг температурных изменений в массиве горных пород и функционирует на расстоянии порядка 4 километров от устья штольни. Это делает её уникальной в контексте исследований, так как она практически не подвержена влиянию большинства внешних факторов, таких как изменения температуры воздуха, атмосферного давления и погодных условий [Кислов, 2013]. Это позволяет обеспечить высокую степень точности и достоверности в получаемых данных, что критически важно для научных экспериментов.

В дополнение к температурной антенне в лаборатории установлен и функционирует сбалансированный комплекс прецизионной геофизической научной аппаратуры. Этот комплекс включает в себя различные инструменты, такие как сейсмометры, магнитометры, барометры и т.д., которые позволяют регистрировать вариации геофизических параметров с высокой точностью [Гравиров и др., 2022]. С помощью этих приборов можно исследовать связи между колебаниями температуры горных пород и другими геофизическими параметрами.

Таким образом, сочетание уникального расположения антенны и высоко-технологичного оборудования в лаборатории создает уникальные условия для проведения научных экспериментов. Это позволяет значительно расширить горизонты знаний в области геофизики и геологии. Данные, полученные с помощью данной антенны, могут существенно способствовать пониманию процессов, происходящих в недрах Земли, а также предсказанию возможных геодинамических событий, таких как извержения вулкана или являться предвестником землетрясения. Использование данных температурной антенны в сочетании с другими методами наблюдения позволяет создать более полную картину температурных и геодинамических процессов в этом стратегически важном районе [Лиходеев и др., 2022]. Это открывает новые горизонты для последующих научных исследований и может привести к значительным достижениям в области геофизики и вулканологии.

Литература

- Гравиров В.В., Децеровский А.В., Кузьмин Ю.О., Лиходеев Д.В., Собисевич А.Л., Широков И.А. Развитие систем прецизионных наклономерных наблюдений в условиях подземной обсерватории // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58. № 1. С. 29–52. DOI: [10.21455/si2022.1-2](https://doi.org/10.21455/si2022.1-2) EDN: [MEPQNA](https://www.edn.ru/MEPQNA)
- Гравиров В.В., Собисевич А.Л., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Канониди К.Х., Децеровский А.В., Пузич И.Н. Северокавказская геофизическая обсерватория: новые аппаратные комплексы и результаты // Сейсмические приборы. 2025. Т. 61. № 3. С. 5–92. DOI: [10.21455/si2025.3-5](https://doi.org/10.21455/si2025.3-5)
- Кислов К.В., Гравиров В.В. Исследование влияния окружающей среды на шум широкополосной сейсмической аппаратуры // Вычислительная сейсмология. Сер. 42. М.: Красанд, 2013. 240 с.
- Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В. Прецизионные дифференциальные термометры для исследования тепловых процессов на базе Северокавказской геофизической обсерватории // Наука и технологические разработки. 2018. Т. 97. № 1. С. 15–24. DOI: [10.21455/std2018.1-2](https://doi.org/10.21455/std2018.1-2) EDN: [XPLLMD](https://www.edn.ru/XPLLMD)
- Лиходеев Д.В., Собисевич А.Л., Гравиров В.В. Приливные эффекты в тонкой структуре тепловых полей по результатам наблюдений в глубокой штольне Северокавказской геофизической обсерватории // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 2. С. 72–77. EDN: [IDSPSJ](https://www.edn.ru/IDSPSJ)

SELECTED ISSUES RELATED TO THE DEVELOPMENT OF A MULTI-CHANNEL PRECISION TEMPERATURE ANTENNA

Gravirov V.V.^{1,2}

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

² Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

E-mail: gravirov@mail.ru

ВЫБОР НАИЛУЧШЕГО СПОСОБА ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Гравиров В.В.^{1,2}, Кислов К.В.²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

E-mail: gravirov@mail.ru

(стендовый доклад)

Измерение температуры является одной из ключевых задач в различных областях науки и техники. Температура, как физическая величина, играет важную роль в процессах, происходящих в природе. В последние десятилетия наблюдается значительный прогресс в области термометрии, что связано с развитием новых технологий и материалов, позволяющих повысить точность и надежность измерений.

Проведем анализ существующих на сегодняшний день прецизионных технологий измерения температуры горных пород. Среди наиболее возможных типов элементов, чувствительных к изменению температуры, термопары предоставляют наиболее доступный и простой способ получения данных. Принцип работы термопар основан на термоэлектрическом эффекте [Гребенюк, 2019]. Точность измерения лучших образцов может достигать 0.001°C. Тем не менее, приборам, базирующимся на использовании термопар, присущи существенные недостатки, а именно: нелинейность характеристик от температуры, чувствительность к помехам, необходимость компенсации холодного спая, а также их ограниченный срок службы.

Технология распределенного акустического зондирования, или DAS, представляет собой инновационный метод измерения температуры, основанный на анализе изменений в характеристиках оптического волокна под воздействием внешней температуры [Кислов, 2022]. В отличие от традиционных точечных датчиков, DAS позволяет непрерывно отслеживать температуру вдоль всего волокна за счет формирования большого количества виртуальных термометров, тем самым предоставляя высокоплотные пространственно-временные данные. Преимущества DAS связаны с тем, что позволяют обеспечить непрерывное измерение температуры на больших расстояниях, что особенно ценно для мониторинга протяженных объектов. Также DAS не требует подвода электропитания в зоне измерения, что повышает безопасность и надежность системы в целом. Однако, к сожалению, на сегодняшний день технология DAS не обладает высокой разрешающей способностью к измерению температуры. Типичная разрешающая способность подобных систем, как правило, не превышает 1.0–0.1°C. С использованием дополнительной обработки данных она может быть улучшена до 0.01°C.

Другим вариантом измерения температур может являться использование в электронных схемах термометров платиновых терморезисторов [Лиходеев, 2019]. К несомненным

достоинствам таких терморезисторов следует, конечно же, отнести их хорошую повторяемость характеристик от одного экземпляра к другому, а также практически линейную зависимость сопротивления от измеряемой температуры, что позволяет создавать относительно простые измерительные приборы на их базе. Они позволяют получить высокую точность измерений и разрешающую способность, достигающую у лучших образцов вплоть до 0.0001°C .

Одним из самых неожиданных вариантов измерения температур горных пород оказываются системы, основанные на чувствительности кварцевых резонаторов к окружающей их температуре. В качестве чувствительного элемента в них используется пьезоэлектрический резонатор с сильной зависимостью частоты от температуры. К достоинствам термочувствительных кварцевых резонаторов следует отнести их высокую температурную чувствительность, достигающую $0.01\text{--}0.001^{\circ}\text{C}$, высокую стабильность работы и простоту использования, а также небольшую стоимость. К недостаткам кварцевых термометров следует отнести их нелинейную зависимость выходного сигнала от температуры, необходимость предварительной калибровки каждого использованного кварцевого резонатора, наличие кратковременных флуктуаций генерируемых сигналов, а также высокие требования по стабильности опорных частот, генерируемых дополнительными температурнезависимыми кварцевыми резонаторами, входящими, как правило, в прецизионные схемы кварцевых термометров.

Сравнивая представленные варианты решения задачи прецизионного измерения температуры горной породы в штольне, можно прийти к обоснованному выводу, что на текущий момент времени наилучшим вариантом будет являться использование электронных термометров на базе платиновых терморезисторов.

Литература

- Гребенюк В.А., Микрюкова Т.П. Термоэлектрические генераторы на основе эффекта Зеебека // Актуальные вопросы современной науки. 2019. № 1(21). С. 12–15.
- 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) EDN: [HOAIXQ](https://www.edn.ru/10.21455/si2022.2-1/)
- Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В., Долов С.М. Прецизионные узкодиапазонные дифференциальные температурные датчики // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 1. С. 11–16. DOI: [10.18358/np-29-1-i1116](https://doi.org/10.18358/np-29-1-i1116) EDN: [ZCTQTZ](https://www.edn.ru/10.18358/np-29-1-i1116/)

CHOOSING THE BEST METHOD FOR PRECISION MEASUREMENTS OF ROCK TEMPERATURE

Gravirov V.V.^{1,2}, Kislov K.V.²

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

² Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

E-mail: gravirov@mail.ru

ВЛИЯНИЕ СИЛЬНЫХ ТУРЕЦКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2023 ГОДА НА ТЕМПЕРАТУРНО-ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ В ШТОЛЬНЕ БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Гравиров В.В.^{1,2}, Першин С.М.³

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

² *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*

³ *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва*

E-mail: gravirov@mail.ru

(стендовый доклад)

В ходе комплексного анализа полученных данных была выявлена значительная корреляция между сигналами деформографа, лазерного лидара и температурной антенны, установленных в тупиковой выработке тоннеля Баксанской нейтринной обсерватории (БНО). Данные наблюдения были проведены в моменты двух сильных землетрясений, произошедших в Турции 6 февраля 2023 года, магнитуды которых составили 7.8 и 7.7 соответственно. Эти землетрясения привлекли наше внимание не только из-за своей мощности, но и из-за их возможного влияния на геофизические процессы, происходящие на значительном удалении от эпицентров.

Проведенная предварительная оценка радиусов зон напряжения, возникших от эпицентров этих землетрясений, составляет приблизительно 2000 километров. Это значение существенно превышает расстояние до тоннелей БНО, которое соответствует приблизительно 900 километрам. Таким образом, существует обоснованная вероятность того, что изменения в напряжённо-деформированном состоянии, которые были зафиксированы в сигналах деформографа, термометра и лидара, действительно могут быть результатом воздействия этих мощных сейсмических событий. Это подчеркивает важность изучения дальнодействующих эффектов землетрясений, а также значимость использования современных технологий для мониторинга геофизических процессов.

В ходе анализа была выявлена интересная особенность в данных деформографа. Так, например, волна сжатия, зарегистрированная от второго землетрясения, оказалась заметно короче по сравнению с волной сжатия от первого. Это может показаться удивительным, учитывая, что мощность первого землетрясения была немного выше. Однако это отличие может быть объяснено ориентацией линий разломов, связанных с каждым из этих землетрясений. Первое землетрясение произошло под некоторым углом к меридиану, в то время как второе – практически под углом 90 градусов к первому. Это различие в ориентации, вероятно, и повлияло на направление распространения волн деформации. Таким образом, волны, образовавшиеся в результате первого землетрясения, были

направлены в сторону Румынии, в то время как волны от второго землетрясения практически точно устремились к Эльбрусу и Баксанскому ущелью.

Проведенный анализ выявил также интересную асимметрию сигналов лидара и температуры скальных пород в моменты первого и второго землетрясений, несмотря на то, что их магнитуда была почти идентичной: 7.8 и 7.7 соответственно. Это указывает на то, что магнитуда не всегда является единственным показателем силы землетрясения и другие факторы, возможно, также играют значительную роль. В частности, в ходе первого землетрясения не было зафиксировано никаких изменений в показаниях лидара и температуры. Однако во время второго землетрясения наблюдалось совпадение резкого сжатия коры Земли с повышением температуры внутри скальной породы тоннеля, что может указывать на взаимосвязь между геодинамическими процессами и тепловыми изменениями в геосфере. Кроме этого, было зафиксировано два существенных выброса аэрозолей, произошедших до и после второго землетрясения. Это поднимает важные вопросы о механизмах, стоящих за такими явлениями. Природа этих отклонений пока не ясна и требует дальнейшего изучения. Одной из гипотез может являться то, что выход ионов выступает в роли центров образования аэрозолей, которые, как было отмечено в предыдущих исследованиях, могут предшествовать землетрясениям. Эта связь между ионными процессами и сейсмическими событиями в настоящий момент является темой активных научных дискуссий и требует дополнительных исследований для подтверждения или опровержения выдвинутых теорий.

Результаты проведенного анализа открывают новые горизонты для понимания предшествующих изменений в геофизической среде перед землетрясениями и могут сыграть ключевую роль в разработке методов прогнозирования сейсмической активности.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН и Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

THE IMPACT OF THE STRONG TURKISH EARTHQUAKES OF 2023 ON THE TEMPERATURE AND FLUID REGIME IN THE TUNNEL OF THE BAKSAN NEUTRINO OBSERVATORY

Gravirov V.V.^{1,2}, Pershin S.M.³

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow*

² *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow*

³ *Prokhorov Institute of General Physics, RAS, Moscow*

E-mail: gravirov@mail.ru

АНАЛИЗ ГРУППИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ИНТРУЗИЙ ПЕРЕД ИЗВЕРЖЕНИЯМИ ВУЛКАНОВ АВГУСТИНА И РЕДАУТ

Греков Е.М.^{1,2}

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

E-mail: grekov.em16@physics.msu.ru

(устный доклад)

Работа посвящена анализу сейсмичности, предвещающей извержения двух вулканов Аляски, с точки зрения сейсмического режима. Для анализа используется каталог вулканической обсерватории Аляски [Power et al., 2019]. В частности, исследуются периоды интрузий перед извержениями вулкана Августина 2006 года и вулкана Редаут 2009 года, где интрузии были выявлены по поверхностным деформациям [Cervelli et al., 2006; Grapethin et al., 2013]. Такие явления представляют особый интерес, так как являются интенсивным внешним воздействием на среду, и благодаря им можно проанализировать сейсмический отклик на такое воздействие. Известно, что перед извержениями часто наблюдаются рои сейсмических событий, сопровождающиеся аномалиями в наклоне графика повторяемости [Jacobs, McNutt, 2010]. Обычно предполагают, что эти рои как раз связаны с интрузией магмы в породы перед извержением. Такие вулканические рои в основном составлены из так называемых вулкано-тектонических землетрясений – событий вулканической природы, являющихся разрывами среды, в этом они схожи с обычными тектоническими землетрясениями. В данной работе мы фокусируемся в основном на анализе режима с точки зрения группирования землетрясений с целью установить, есть ли какая-то внутренняя структура или неоднородность событий в периоды интрузий. С помощью метода ближайшего соседа удалось выделить два различных типа сейсмического режима во время интрузий – фоновый и кластеризованный. Первый имеет большие временные расстояния до ближайшего соседа, большой показатель наклона графика повторяемости и меньшие магнитуды. Во втором расстояния и *b-value* меньше, к тому же события этого режима объединяются в серии, в течение которых нарастает число событий и их магнитуда, а завершается серия событием с наибольшей магнитудой с небольшим количеством последующих афтершоков. Это можно объяснить следующим образом. На своем пути интрузия встречает некоторые барьеры, для прорыва которых сперва необходимо накопить напряжения. Пока напряжения копятся, наблюдается затишье, после же достижения нужного предела начинается разрушение с малых масштабов, которое завершается сильнейшим событием – прорывом.

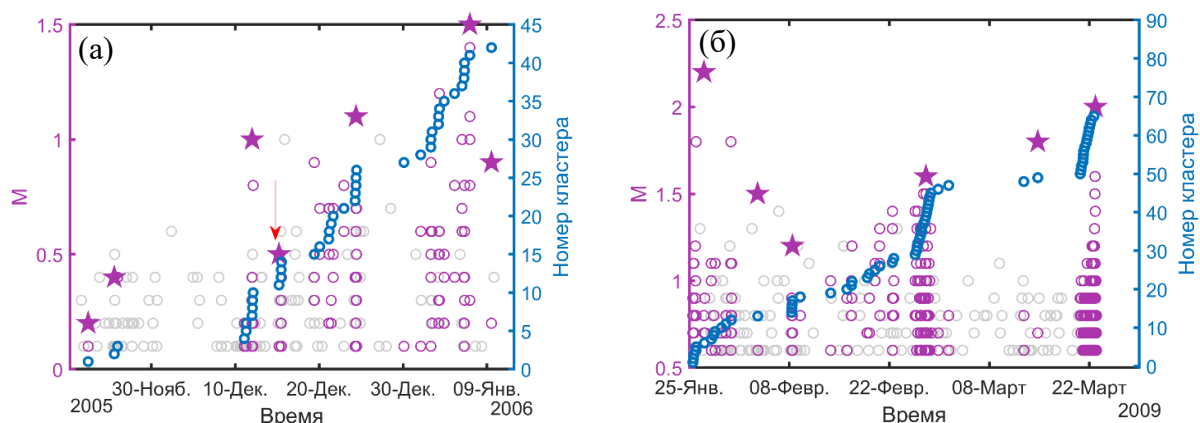


Рис. График распределения серий кластеров во времени: а – для интрузии на вулкане Августина, б – для интрузии на вулкане Редаут. Серые кружки – фоновые события, фиолетовые кружки – события, входящие в кластеры, фиолетовые звёзды – сильнейшие события в сериях, синие кружки – средняя дата событий кластеров

Работа выполнена за счёт средств гранта Российского научного фонда №25-17-00094 «Создание методики расчета зависящей от времени сейсмической опасности».

Литература

- Cervelli P.F., Fournier T., Freymueller J., Power J.A. Ground deformation associated with the precursory unrest and early phases of the January 2006 eruption of Augustine Volcano, Alaska // *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33. L18304. DOI: [10.1029/2006GL027219](https://doi.org/10.1029/2006GL027219)
- Grapethin R., Freymueller J., Kaufman A.M. Geodetic observation during the 2009 eruption at Redoubt volcano // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2013. V. 259. P. 115–132. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2012.04.021](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.04.021)
- Jacobs K., McNutt S. Using seismic b-values to interpret seismicity rates and physical processes during the preeruptive earthquake swarm at Augustine Volcano 2005–2006. // *US Geological Survey Professional Paper*. 2010. P. 59–75. DOI: [10.3133/pp17693](https://doi.org/10.3133/pp17693)
- Power J.A., Friberg P.A., Haney M.M., Parker T., Stihler S.D., Dixon J.P. A unified catalog of earthquake hypocenters and magnitudes at volcanoes in Alaska – 1989 to 2018 // *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report* 2019-5037. 2019. 17 p. DOI: [10.3133/sir20195037](https://doi.org/10.3133/sir20195037)

ANALYSIS OF EARTHQUAKE CLUSTERING DURING THE INTRUSION PROCESSES BEFORE THE AUGUSTINE AND REDOUBT VOLCANOES ERUPTIONS

Grekov E.M.^{1,2}

¹ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

² Lomonosov Moscow State University, Moscow

E-mail: grekov.em16@physics.msu.ru

К ВОПРОСУ О ВЫЯВЛЕНИИ АНОМАЛИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ЗЕМНОЙ КОРЕ И ИХ ВОЗМОЖНАЯ СВЯЗЬ С ПОДГОТОВКОЙ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Григорян А.Г.¹, Канониди К.Х.²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк

E-mail: ag-grig@ifz.ru

(устный доклад)

С целью изучения геодинамического процесса, происходящего в земной коре при подготовке сильных землетрясений в некоторых сейсмоактивных районах Земли, были изучены вариации переменного геомагнитного поля δT .

Используя все доступные нам данные наблюдения магнитовариационных станций, мы имели возможность изучить изменения электромагнитной индукции или электропроводности в земной коре при подготовке сильных землетрясений: Парванийского (1986 г., $M = 5.4$); Спитакского (1988 г., $M = 7.0$); Л'Аквилийского (06.04.2009, $M = 5.4$); Турецких (23.11.2021, $M = 6.0$; 06.02.2023, $M = 7.8$).

Для оценки состояния геологической среды, которое отражается в изменениях переменного геомагнитного поля δT , применялся расчетный параметр $N(A)$, который является отношением амплитуд синхронно измеренных вариаций компонент δT поля, вызываемых внешним источником,

$$N(A) = A_i/A_j,$$

где A_i и A_j – амплитуды вариаций, измеренных на разных i, j пунктах.

Как известно, перед сильными землетрясениями в геологической среде меняется электропроводность, фактически меняются физические свойства пород. Расчетный параметр $N(A)$ характеризует динамику изменения электромагнитной индукции (электропроводности) горных пород. Для получения более детальной информации об изменении электромагнитной индукции на разных горизонтах земной коры, помимо Sq-вариаций, были изучены также бухтообразные вариации (Db) разных периодов компонент δZ и δH . Изучены вариации с периодами 10–25 мин, 30–60 мин, 60–90 мин [Григорян, 2007].

Период геомагнитных вариаций отражает глубину проникновения поля вариаций. Расчёты показывали, что глубина проникновения поля вариаций для Sq-вариаций до 280 км (5–25 минут) 2–8 км, (30–60 минут) 10–20 км [Безуглая и др., 1986].

Кроме расчетного параметра $N(A)$ также был применен метод синхронной разности полного вектора магнитного поля δT . Вариации переменного геомагнитного поля δT ,

зарегистрированные на поверхности земли δH^H , являются суммой внешнего δH^e и внутреннего δH^i составляющих:

$$\delta H^H = \delta H^e + \delta H^i.$$

В конечном счете, вопрос сводился к рассмотрению связи вариаций внешнего поля с географической широтой и местным временем.

Метод применяется на низких широтах Земли, где вариации геомагнитного поля хорошо выделяются. В системе наблюдений две станции должны находиться в сейсмоактивной зоне изучаемой территории, а одна – в относительно спокойной. Выбранный Ю.П. Сковородкиным систем наблюдений в Армении полностью удовлетворил требованиям метода. В итоге:

а) Представлены результаты изучения изменения магнитных векторов на территории Армении, Италии и Турции перед местными сейсмическими событиями. Эти изменения отражают развитие геодинамических процессов в земной коре и связаны с изменением физических свойств геологической среды (электропроводность) [Гуфельд, 2019; Киссин, 2016].

б) Показаны способы выявления среднесрочных предвестников следующих землетрясений: Парванийского (1986 г., $M = 5.4$); Спитакского (1988 г., $M = 7.0$); Л’Акуилийского (06.04.2009, $M = 5.4$). Некоторые результаты показаны на рис. 1–4.

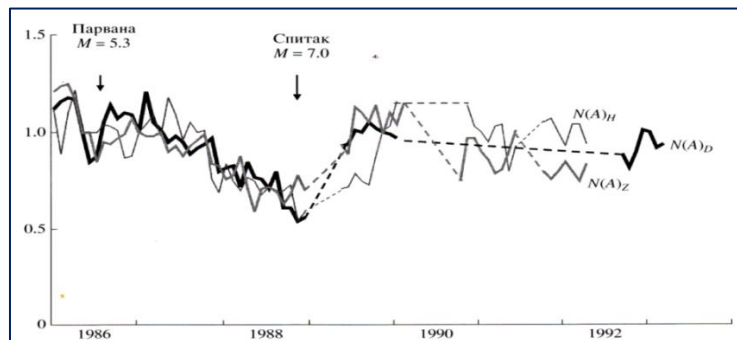


Рис. 1. Изменение среднемесячных значений параметра $N(A)$ для Sq вариаций компонентов δD , δH и δZ геомагнитного поля δT между станциями Джрадзор – Товуз за период 1986–1993 гг.

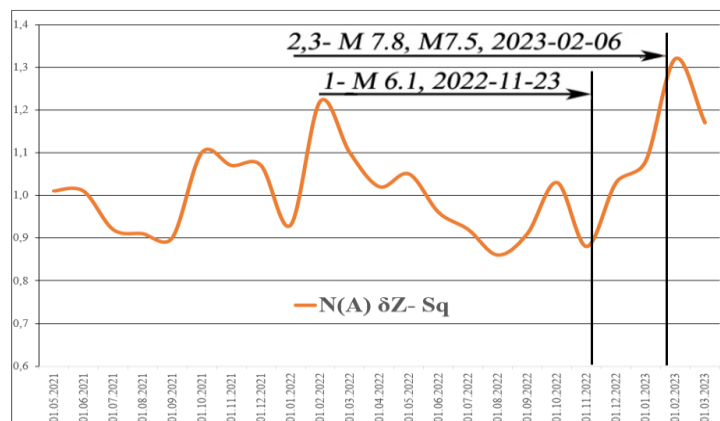


Рис. 2. Изменение среднемесячных значений расчетного параметра $N(A)\delta Z$ между станциями GL (Армения) и IZN (Турция) за период май 2021–2023 гг.

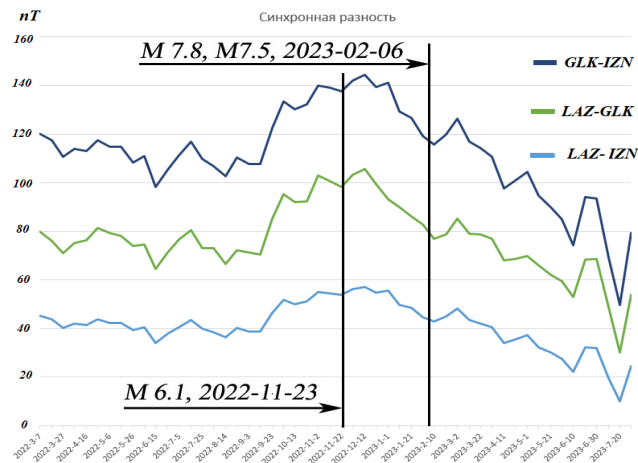


Рис. 3. Синхронная разность геомагнитного поля δT между станциями IZN (Турция) и GLK (Армения) и LAZ (Крым) за период 2021–2023 гг.

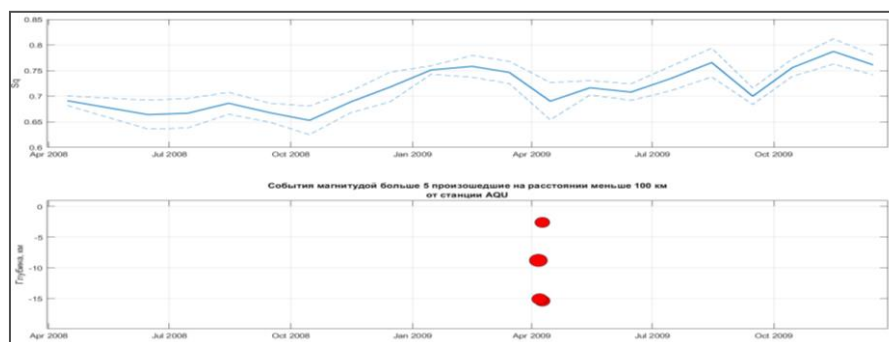


Рис. 4. Изменение параметра $N(A)H$ для Sq-вариаций перед землетрясением 2009 г. $M = 6.5$ в районе г. Л'Акуили, Италия

Литература

- Безуглая Л.С., Колюковский В.Л., Прохоров А.А., Сковородкин Ю.П., Тоноян Е.П. Исследование прохождения геомагнитных вариаций с помощью модульных измерений на Душанбинском и Гармском полигонах Таджикской ССР // Прогноз землетрясений, № 7. Душанбе: Дониш, 1986. С. 158–161.
- Григорян А.Г. Изменения локального геомагнитного поля внешнего происхождения на примере Армении // Физика Земли. 2007. № 6. С. 88–95. EDN: [IBANKH](#)
- Гуфельд И.Л. Проявление дегазации в параметрах геологической среды // Сейсмическая опасность: предотвратить или предупредить. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2019. 98 с. ISBN: 978-5-00077-983-6
- Киссин И.Г. Флюидный режим очага и области подготовки землетрясения // Физика Земли. 2016. № 5. С. 102–119. DOI: [10.7868/S0002333716040025](#) EDN: [WHWBXT](#)

STRONG ON THE QUESTION OF IDENTIFYING ANOMALIES OF ELECTROMAGNETIC INDUCTION IN THE EARTH'S CRUST AND THEIR POSSIBLE CONNECTION WITH THE PREPARATION OF EARTHQUAKES

Grigorian A.G.¹, Kanonidi K.Kh.²

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

² Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave
Propagation, RAS, Moscow, Troitsk

E-mail: ag-grig@ifz.ru

АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА. НОВЫЕ ДАННЫЕ

Гридчина М.С.^{1,2}, Стеблов Г.М.^{1,3}

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

² Публично-правовая компания «Роскадастр», г. Москва

³ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

E-mail: gridchina.maria@mail.ru

(устный доклад)

Дальний Восток России – уникальный регион взаимодействия нескольких литосферных плит в условиях интенсивной субдукции. В настоящем исследовании проведен анализ геодинамики двух активных зон Дальнего Востока: Сахалинской системы разломов и Алеутской островной дуги в районе Командорских островов. Несмотря на принадлежность к субдукционному типу границ, данные области контакта литосферных плит обладают фундаментальными отличиями как в геометрии, включая угол падения сейсмофокальной зоны, так и в интенсивности движений, наблюдаемых на поверхности.

В основу исследования легли новые данные повторных наблюдений ГНСС на Северо-Сахалинском геодинамическом полигоне Росреестра (ССГДП) за многолетний период, а также на постоянно действующих станциях, расположенных на Командорских островах, за период после сильного землетрясения 17.07.2017 с $M_w = 7.8$ вблизи них. В результате обработки по ежесуточным решениям составлены временные ряды координат пунктов, по которым выполнена оценка скоростей смещения пунктов. Для командорских станций применена специальная методика оценки скоростей, ввиду существенных сейсмических ступенчатых смещений на графиках, а также визуального отличия наклона линии тренда до и после сильного землетрясения 20.12.2018 с $M_w = 7.2$.

Существенные изменения в векторах скоростей смещения станций (порядка 20–30° по направлению и 27% в среднем по длине) до события 17.07.2017 (опубликованы ранее в [Kogan et al., 2017]), между сильными землетрясениями и после 20.12.2018 (см. рис.) могут говорить о многократном перераспределении движений на контакте плит.

В то же время, в результате моделирования механического сцепления на сахалинском участке контакта Амурской и Охотоморской плит по оценкам скоростей на пунктах ССГДП, опубликованного ранее в [Гридчина и др., 2023], выявлены зоны максимального сцепления, а также высокого градиента, совпадающие с локализацией очагов двух сильнейших за последние 30 лет землетрясений в регионе: Нефтегорского (27.05.1995, $M_w = 7.0$, глубина 23.6 км) и Углегорского (04.08.2000, $M_w = 6.8$, глубина 15.0 км).

Таким образом, выявлены существенные различия в реакции на сильные сейсмические события структур рассмотренных участков контакта плит на Дальнем Востоке.

Установлено, что распределение механического сцепления и связанные с ним поверхностные деформации в Сахалинской зоне демонстрируют относительную стабильность после реализации сильных сейсмических событий, что может указывать на дефицит выделения сейсмического момента и высокую вероятность новых сильных землетрясений в регионе. В то же время, в районе Командорских островов за период наблюдений зафиксирована многократная перестройка режима межплитового взаимодействия, сопровождавшая каждое сильное землетрясение за рассмотренный период и отразившаяся в значительных изменениях оценок скоростей смещений земной поверхности.

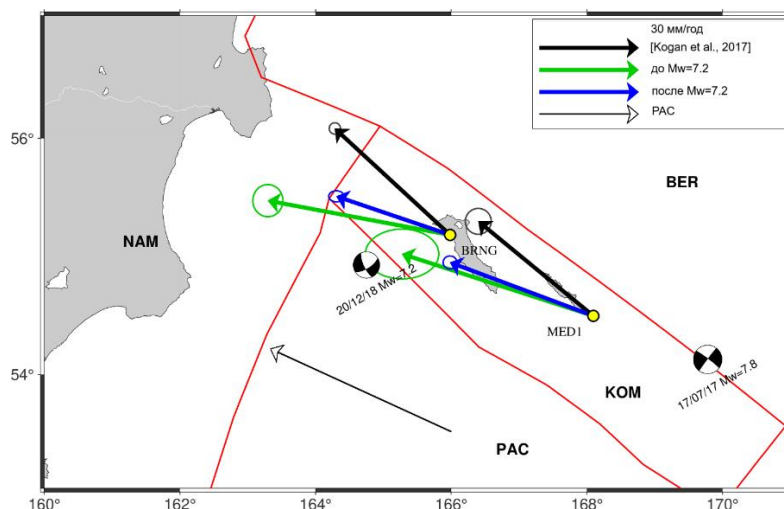


Рис. Скорости смещения станций Командорских о-вов за разные периоды

Результаты свидетельствуют о принципиально отличающихся режимах сейсмического цикла и релаксационных процессов в сравниваемых зонах, обусловленных различиями в их глубинной структуре и характере движений на контакте плит.

Литература

- Гридчина М.С., Стеблов Г.М., Владимирова И.С., Басманов А.В. Исследование зоны сочленения литосферных плит в пределах о. Сахалин по данным спутниковой геодезии // Геофизические исследования. 2023. Т. 24. № 4. С. 81–96. DOI: [10.21455/gr2023.4-5](https://doi.org/10.21455/gr2023.4-5) EDN: [KDEGAA](https://www.edn.ru/kdegaa)
- Kogan M.G., Frolov D.I., Vasilenko N.F., Freymueller J.T., Steblov G.M., Ekström G., Titkov N.N., Prytkov A.S. Plate coupling and strain in the far western Aleutian arc modeled from GPS data // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. № 7. P. 3176–3183. DOI: [10.1002/2017GL072735](https://doi.org/10.1002/2017GL072735) EDN: [WJMDOI](https://www.edn.ru/wjmdoi)

ACTIVE FAULTS OF THE FAR EAST. NEW DATA

Gridchina M.S.^{1,2}, Steblov G.M.^{1,3}

¹ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

² Public-law company “Roskadastr”, Moscow

³ Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

E-mail: gridchina.maria@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО СЕЙСМОМЕТРА НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОФОНОВ И ЦИФРОВОЙ ЧАСТОТНОЙ КОРРЕКЦИИ

Дергач П.А.^{1,2}, Дробчик А.Н.¹, Абраменков С.С.^{1,2}

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

E-mail: dergachpa@ipgg.sbras.ru

(устный доклад)

В работе представлены результаты тестирования прототипа широкополосного сейсмометра, сконструированного на основе современных 5-герцовых геофонов (рис. 1а). Благодаря алгоритму низкочастотной деконволюции [Юшин, 2001; Дергач и др., 2018], частотный диапазон цифровой записи сейсмометра можно значительно расширить.

Тестирование производилось на сейсмологическом пункте ИНГГ СО РАН, расположенном в Новосибирской области. В частности, производилось сопоставление низкочастотных сигналов от далеких землетрясений, записанных при помощи прототипа сейсмометра, а также широкополосных сейсмометров Guralp CMG-6T и GL-CS60 (рис. 1б).

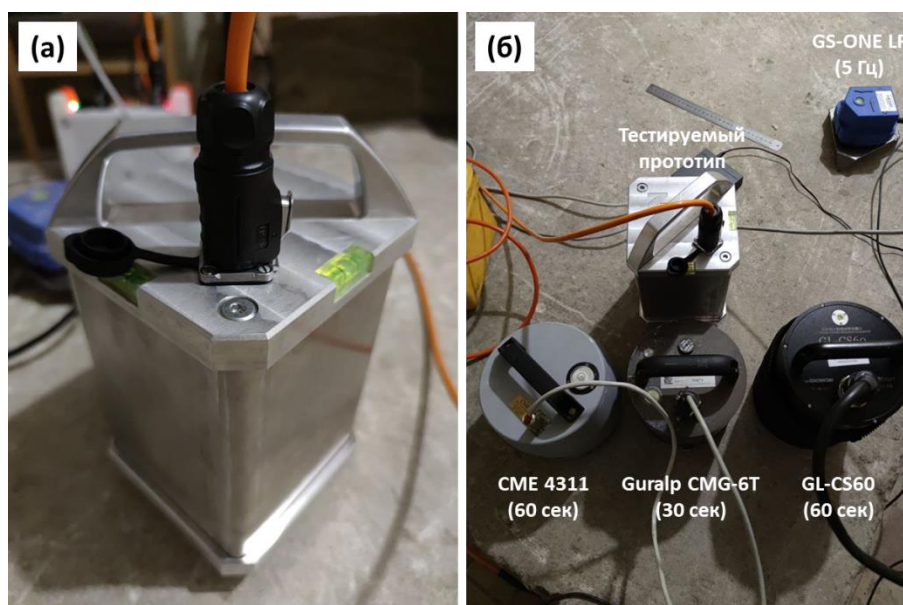


Рис. 1. Прототип широкополосного сейсмометра на основе современных 5-герцовых геофонов (а) и его тестирование на сейсмологическом пункте (б)

На рис. 2 представлены результаты сопоставления записей (а) и их амплитудных спектров (б) землетрясения с магнитудой М6.4, произошедшего 15.02.2025 на территории Горного Алтая (информация Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН). Красная линия – сигнал, записанный прототипом сейсмометра с частотным диапазоном, расширенным до значения 0.03 Гц; синяя линия – сигнал от 30-секундного сейсмометра Guralp CMG-6T. Как видно, в целевом частотном диапазоне от 0.03 до 50 Гц сигналы практически идентичны.

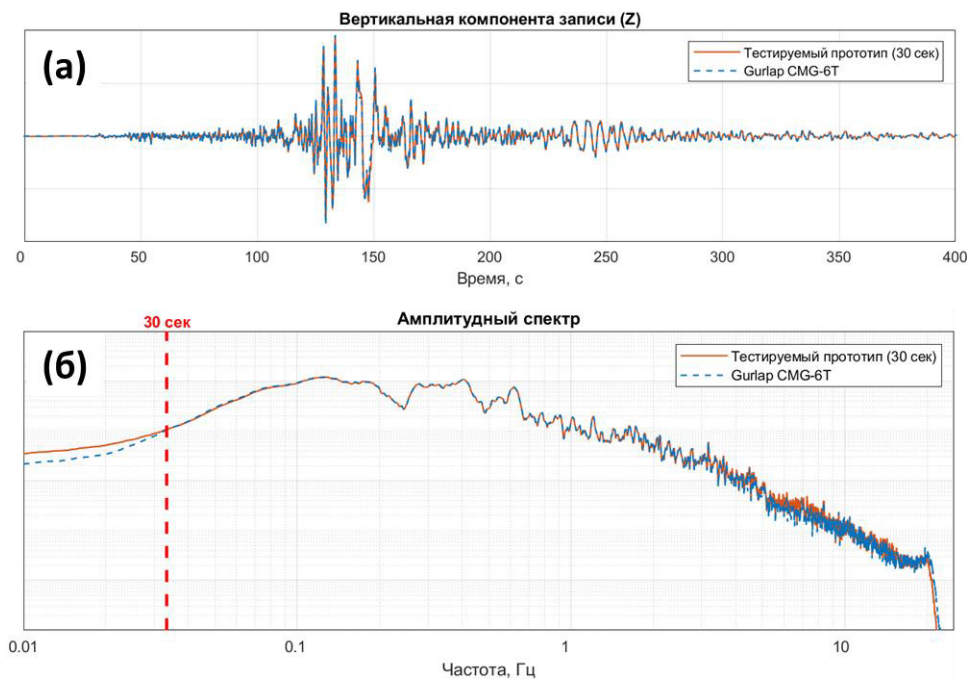


Рис. 2. Сопоставление записей землетрясения с магнитудой М6.4 и эпицентральной расстоянием 600 км, произведенных тестируемым прототипом и широкополосным сейсмометром Guralp CMG-6T (а), а также их амплитудных спектров (б)

Использование сейсмометров на основе современных геофонов позволяет в несколько раз снизить стоимость регистрирующей аппаратуры, и, как следствие, появляется возможность увеличить плотность сетей и их чувствительность. Дополнительное преимущество – сейсмометры на основе геофонов не требуют использования источников электропитания, что позволяет в несколько раз снизить емкость и вес батарей, используемых на сейсмологическом пункте, что является безусловным плюсом при разворачивании сетей в труднодоступных районах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-17-00237.

Литература

- Дергач П.А., Тубанов Ц.А., Юшин В.И., Дучков А.А. Особенности программной реализации алгоритмов низкочастотной деконволюции // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 3. С. 22–34. DOI: [10.21455/si2018.3-2](https://doi.org/10.21455/si2018.3-2) EDN: [SAHQHV](https://www.edn.ru/SAHQHV)
- Юшин В.И. Низкочастотная деконволюция цифровой записи короткопериодного сейсмометра // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 5. С. 852–863. EDN: [KAYWWO](https://www.edn.ru/KAYWWO)

THE RESULTS OF TESTING A BROADBAND SEISMOMETER BASED ON MODERN GEOPHONES AND DIGITAL FREQUENCY CORRECTION

Dergach P.A.^{1,2}, Drobchik A.N.¹, Abramnikov S.S.^{1,2}

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk

² Novosibirsk State University, Novosibirsk

E-mail: dergachpa@ipgg.sbras.ru

ПРИМЕНЕНИЕ СИНОПТИЧЕСКИХ АНИМАЦИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА МЕСТ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ ГНСС НАБЛЮДЕНИЙ

Докукин П.А.¹, Кафтан В.И.²

¹ Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва

² Геофизический центр РАН, г. Москва

E-mail: dokukin-pa@rudn.ru

(устный доклад)

Отсутствие взаимных движений бортов тектонического разлома свидетельствует о накоплении упругих напряжений, сброс которых приводит к землетрясению. Сети ГНСС позволяют заблаговременно до сейсмического события и, как правило, в месте будущего эпицентра выявить дефицит внутренних смещений (ДВС) – наименее подвижную область земной коры, как недостаточность модуля вектора горизонтальных смещений, определенного во внутренней системе отсчета. При этом векторы смещений определяются по отношению к центру их статистического распределения. Таким образом выявляются взаимные движения, способствующие возникновению сейсмогенерирующих напряжений и разрушений.

Для анализа используем результаты финальной математической обработки временных рядов координат непрерывных ГНСС-станций [Blewitt et al., 2018].

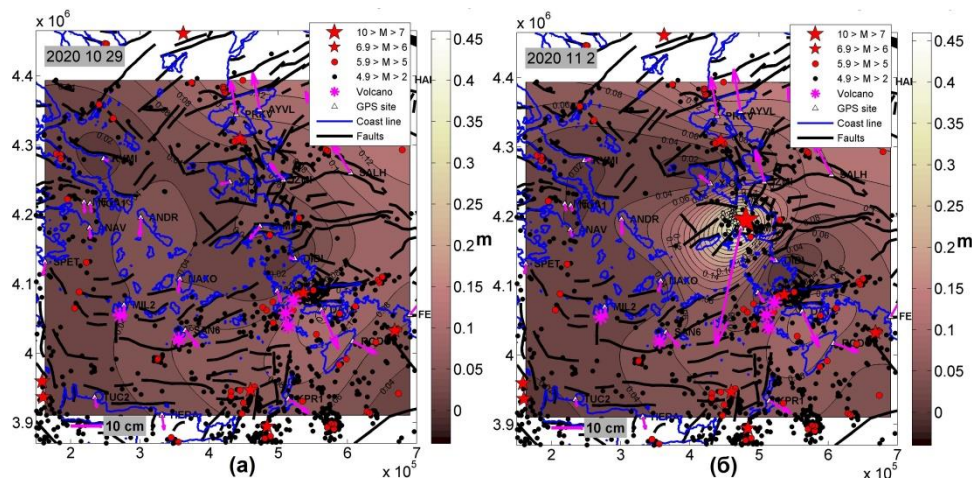


Рис. Кадры синоптических анимаций. (а) – Тёмно-коричневая область дефицита до и (б) – светлая область разрушения перед землетрясением Самос (30 октября 2020 г., $M = 7$)

Анализ распределения модуля вектора внутренних смещений позволяет обнаружить участки земной коры, ассоциируемые с местами пониженной и повышенной прочности. Для их регистрации строятся цифровые и графические модели их пространственного распределения – кадры полей дефицита смещений, объединяемые в синоптическую анимацию, позволяющую осуществить анализ поведения ДВС и сейсмической активности в связи с тектоникой региона (см. рис.). Эволюция пространственно-временных изменений

движений и деформаций земной коры с помощью кинематических анимационных моделей показывает значительное сходство поведения метеорологических и гидрологических процессов с процессами в земной коре, наблюдаемыми в ускоренном визуальном представлении.

Синоптические анимации для разных регионов представлены в [Dokukin *et al.*, 2023a; 2025; 2023b; 2024; Kaftan *et al.*, 2024]. Исследования показывают, что сильные неглубокие землетрясения происходят в местах локализации минимальных внутренних смещений, контролируемых ГНСС-сетями (как внутри зон ДВС, так и в районах перехода от быстрых к медленным движениям). В большинстве случаев эпицентральные зоны согласуются с тектоническими линеаментами регионов. Результаты исследований позволяют предлагать новый метод прогноза мест сильных землетрясений и уточнения сейсмической опасности по данным ГНСС-наблюдений.

Литература

- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C. Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science // *Eos*. 2018. V. 99. DOI: [10.1029/2018EO104623](https://doi.org/10.1029/2018EO104623)
- Dokukin P., Gök E., Kaftan I., Kaftan V., Shevchuk R. Evolution of the crustal inner shear deficit in a reference to 2010-2023 Aegean Sea earthquakes // *ESDB repository*. 2024. GCRAS, Moscow. DOI: [10.2205/esdb-aegean-deficit](https://doi.org/10.2205/esdb-aegean-deficit)
- 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*. 2023a. GCRAS, Moscow. DOI: [10.2205/ESDB-Ekinozu-Nurdagi-quakes](https://doi.org/10.2205/ESDB-Ekinozu-Nurdagi-quakes)
- Dokukin P.A., Kaftan V.I., Manevich A.I., Shevchuk R.V. Evolution of the seismic process and crustal total shear strain (2008–2021) under the influence of the Hikurangi mantle superplume // *ESDB repository*. 2023b. GCRAS, Moscow. DOI: [10.2205/ESDB-Hikurangi-shear](https://doi.org/10.2205/ESDB-Hikurangi-shear)
- Dokukin P.A., Kaftan V.I., Titkov N.N., Chebrov D.V. Five-Year Evolution of Regional Seismicity and Deficit of Internal Crustal Displacements According to Gnss Data in Connection with the Kamchatka Megathrust Earthquake of 2025 // *ESDB repository*. 2025. GCRAS, Moscow. DOI: [10.2205/esdb-kamchatka-2025](https://doi.org/10.2205/esdb-kamchatka-2025)
- Kaftan V.I., Melnikov A.Yu., Dokukin P.A. Evolution of crustal inner displacement deficit in connection with strongest Taiwan's earthquakes migration according to GPS data from 2014 to 2024 // *ESDB repository*. 2024. GCRAS, Moscow. DOI: [10.2205/esdb-taiwan-quake-2014-2024](https://doi.org/10.2205/esdb-taiwan-quake-2014-2024) EDN: [FJKOVR](https://www.edn.ru/entry/FJKOVR)

APPLICATION OF SYNOPTIC ANIMATIONS FOR PREDICTING STRONG EARTHQUAKE LOCATIONS BASED ON GNSS OBSERVATIONS

Dokukin P.A.¹, Kaftan V.I.²

¹ Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

² Geophysical Center, RAS, Moscow

E-mail: dokukin-pa@rudn.ru

ОЦЕНКА СКОРОСТИ РОСТА ПАЛИНСТРОФИИ В ДВУМЕРНОЙ ИДЕАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ: ОПЫТ ПОДХОДА НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Желиговский В.А.

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

E-mail: vlad@mitp.ru

(устный доклад)

Завихренность $\omega = \nabla \times \mathbf{v}$ двумерного течения $\mathbf{v}(x_1, x_2)$ идеальной несжимаемой жидкости описывается скалярным полем: $\omega = (0, 0, \omega)$. Ротор уравнения Эйлера показывает, что ω переносится течением как скалярная примесь. Поэтому $\max_{\mathbb{T}^2} |\omega|$ ограничено при всех временах ($\mathbb{T}^2 = [-\pi, \pi]^2$ обозначает квадратную ячейку периодичности).

Рост палинстрофии $\|\omega\|_1^2 = (2\pi)^{-2} \int_{\mathbb{T}^2} |\nabla \omega|^2 dx$ ограничен сверху функциями вида $C \exp(C \exp(Ct))$ [Bardos, 1976; Bardos, Benachour, 1977], однако эта оценка сильно завышена: столь быстрый рост расчетами не подтверждён. Из уравнения Эйлера следует

$$\frac{d}{dt} \|\omega\|_1^2 = 2 \sum_{0 \neq \mathbf{k} \neq \mathbf{n} \neq 0} |\mathbf{k}|^{-2} (\mathbf{n} \cdot \mathfrak{R} \mathbf{k}) |\mathbf{n}|^2 \hat{\omega}_{\mathbf{k}} \hat{\omega}_{\mathbf{n}-\mathbf{k}} \hat{\omega}_{-\mathbf{n}} \equiv \sigma(\omega)$$

($\mathfrak{R}: \mathbf{k} \mapsto (k_2, -k_1)$ – поворот по часовой стрелке на угол $\pi/2$). Использование методов функционального анализа затруднено, т.к. (i) норму $\max_{\mathbb{T}^2} |\cdot|$ трудно оценить точно в терминах коэффициентов Фурье $\hat{\omega}_{\mathbf{n}}$ и (ii) в σ происходят существенные численные сокращения, как показывают эквивалентные выражения:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sum_{0 \neq \mathbf{k} \neq \mathbf{n} \neq 0} |\mathbf{n}| |\mathbf{n} - \mathbf{k}| \sin(\theta_{\mathbf{n}, \mathbf{k}} + \theta_{\mathbf{n}-\mathbf{k}, \mathbf{k}}) \hat{\omega}_{\mathbf{k}} \hat{\omega}_{\mathbf{n}-\mathbf{k}} \hat{\omega}_{-\mathbf{n}} \\ &= (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)^{-1} \sum_{\substack{\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2 + \mathbf{n}_3 = 0, \\ \mathbf{n}_j \neq 0}} (\mathbf{n}_2 \cdot \mathfrak{R} \mathbf{n}_1) \det \begin{bmatrix} |\mathbf{n}_1|^{2p} & |\mathbf{n}_2|^{2p} & |\mathbf{n}_3|^{2p} \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ |\mathbf{n}_1|^{-2} & |\mathbf{n}_2|^{-2} & |\mathbf{n}_3|^{-2} \end{bmatrix} \hat{\omega}_{\mathbf{n}_1} \hat{\omega}_{\mathbf{n}_2} \hat{\omega}_{\mathbf{n}_3} \end{aligned}$$

($\theta_{\mathbf{a}, \mathbf{b}}$ – угол от вектора $\mathbf{a}$ к $\mathbf{b}$ против часовой стрелки, α_j – произвольные константы, не зависящие от векторных индексов суммирования $\mathbf{n}_j$).

Естественно вычислять $C_p = \max_{\omega_p} \sigma_p(\omega_p) / (\|\omega\|_1^2 \max_{\mathbb{T}^2} |\omega_p|)$ для конечных рядов Фурье ω_p с волновыми числами $|n_j| \leq 2^p - 1$. Независимость C_p от p укажет на экспоненциальный рост палинстрофии, в противном случае характер роста C_p с p укажет на более правдоподобную оценку скорости её роста.

Проект выполняется. Вычислено $C_3 = 0.5112$, $C_4 = 0.7797$. Соответствующие ω_p инвариантны относительно поворота на угол $\pi/2$ вокруг точки локального (но не

глобального) максимума $|\omega_p|$. Цветовая кодировка на рисунке изолиний ω_p , нормированной на $\max_{\mathbb{T}^2} |\omega_p|$: -0.9, -0.8 – красный, -0.7, -0.6 – светло-фиолетовый, -0.5, -0.4 – темно-фиолетовый, -0.3, -0.2 – желтый, -0.1 – коричневый, 0 – черный, 0.1 – светло-зеленый, 0.2, 0.3 – темно-зеленый, 0.4, 0.5 – светло-синий, 0.6, 0.7 – темно-синий, 0.8, 0.9 – морской волны.

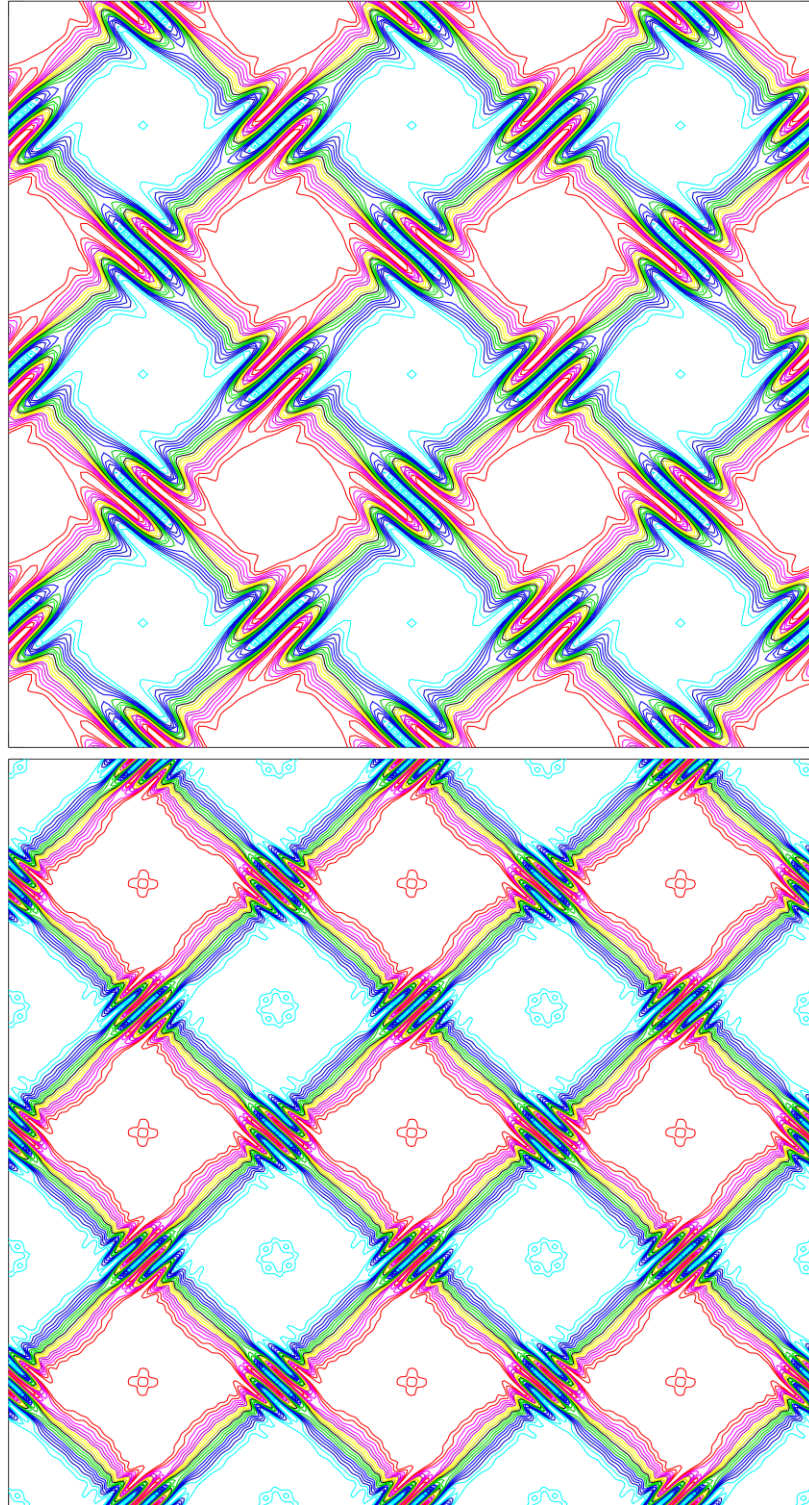


Рис. Изолинии завихренности, доставляющей максимум C_p для $p = 3$ (верхняя панель) и $p = 4$ (нижняя панель). Показано по 9 смежных ячеек периодичности течения

Литература

- Bardos C.* Analyticité de la solution de l'équation d'Euler dans un ouvert de $\mathbb{R}^n$ // Comptes rendus de l'Académie des Sciences. 1976. V. A283. P. 255–258.
- Bardos C., Benachour S.* Domaine d'analyticité des solutions de l'équation d'Euler dans un ouvert de $\mathbb{R}^n$ // Annali della Scuola Normale Superiore di Pisa, Classe di scienze 4e ser. 4. 1977. P. 647–687.

**ESTIMATING THE PALINSTROPHY GROWTH
IN TWO-DIMENSIONAL IDEAL HYDRODYNAMICS:
AN APPROACH BASED ON COMPUTATIONAL EXPERIMENT**

Zheligovsky V.

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

E-mail: vlad@mitp.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНИМОСТИ УРАВНЕНИЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДИСПЕРГИРУЮЩИХ ВОЛН ЦУНАМИ НА ПРИМЕРЕ СОБЫТИЙ ТИХООКЕАНСКОГО РЕГИОНА

Зарубина А.И.¹, Строгов Т.А.¹, Колесов С.В.^{1,2}, Большакова А.В.¹, Носов М.А.^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Физический факультет, г. Москва

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

E-mail: zarubina.ai17@physics.msu.ru

(устный доклад)

Модели динамики волн цунами в большинстве случаев строятся в рамках приближения мелкой воды. Существенный недостаток таких моделей заключается в их ограниченной способности к воспроизведению диспергирующих волн. Попытки введения критериев, позволяющих судить об области применимости длинноволновых моделей, предпринимались ранее многими исследователями [*Пелиновский*, 1982; *Glimsdal et al.*, 2013; *Kajiura*, 1963; *Kulikov et al.*, 1996]. Субъективность оценки точности воспроизведения волн, а также неоднозначность определения параметров, входящих в критерии, мотивировали нас к разработке собственного подхода, свободного от отмеченных недостатков. В нашей работе [*Носов, Зарубина*, 2023] мы предложили объективную количественную меру точности воспроизведения волн и установили ее связь со степенью запаздывания диспергирующего волнового пакета от фронта длинных волн. На основе полученных результатов в работе [*Nosov et al.*, 2025] был разработан практический метод оценки области пространства, в которой бездисперсионная теория длинных волн способна воспроизводить диспергирующие волны цунами с заданной точностью. Судить о точности мы предлагаем по степени запаздывания диспергирующего волнового пакета относительно фронта длинных волн, которая рассчитывается вдоль волновых лучей, выпущенных из центра источника под различными азимутальными углами. Расчет лучей реализован на сферической поверхности с учетом рельефа дна, который был сглажен для удовлетворения условиям применимости лучевой теории. По данным о начальном возвышении свободной поверхности в очаге и распределении глубин океана определяется доминирующий период волн цунами. Определение доминирующего периода основано на формуле, полученной нами методом стационарной фазы в работе [*Строгов и др.*, 2025]. По значению доминирующего периода в заданном направлении и профилю глубин вдоль луча рассчитывалась степень запаздывания диспергирующего волнового пакета. Целью настоящей работы является применение развитых методик к набору цунами-событий Тихоокеанского региона.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Литература

- Носов М.А., Зарубина А.И. Критерий применимости теории длинных волн для описания диспергирующих волн цунами // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 4. С. 485–496. DOI: [10.31857/S0002351523040132](https://doi.org/10.31857/S0002351523040132) EDN: [YOYESH](https://www.edn.ru/yoYESH)
- Пелиновский Е.Н. Нелинейная динамика волн цунами. Горький: ИПФ АН СССР, 1982. 216 с.
- Строгов Т.А., Зарубина А.И., Носов М.А. Азимутальное распределение доминирующих периодов волн цунами, формируемых косейсмическими смещениями дна // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2025. (в печати)
- Glimsdal S., Pedersen G.K., Harbitz C.B., et al. Dispersion of tsunamis: does it really matter? // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2013. V. 13. № 6. P. 1507–1526. DOI: [10.5194/nhess-13-1507-2013](https://doi.org/10.5194/nhess-13-1507-2013) EDN: [VFBSXB](https://www.edn.ru/vFBSXB)
- Kajiura K. The leading wave of a tsunami // Bulletin of the Earthquake Research Institute. 1963. V. 41. № 3. P. 535–571.
- Kulikov E.A., Rabinovich A.B., Thomson R.E., et al. The landslide tsunami of November 3, 1994, Skagway harbor, Alaska // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1996. V. 101. № C3. P. 6609–6615. DOI: [10.1029/95JC03562](https://doi.org/10.1029/95JC03562) EDN: [JUNIUI](https://www.edn.ru/JUNIUI)
- Nosov M.A., Zarubina A.I., Kolesov S.V. Assessment of the Area of Applicability of the Shallow-Water Approximation for Reproducing Dispersive Tsunami Waves // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2025. T. 61. № 4. С. 420–430. DOI: [10.1134/S0001433825700768](https://doi.org/10.1134/S0001433825700768) EDN: [IBYATX](https://www.edn.ru/IBYATX)

DETERMINATION OF THE APPLICABILITY OF SHALLOW WATER EQUATIONS FOR NUMERICAL REPRODUCTION OF DISPERSING TSUNAMI WAVES USING THE EXAMPLE OF EVENTS IN THE PACIFIC REGION

Zarubina A.I.¹, Strogov T.A.¹, Kolesov S.V.^{1,2}, Bolshakova A.V.¹, Nosov M.A.^{1,2}

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow

² Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

E-mail: zarubina.ai17@physics.msu.ru

ВЫЗЫВАЮТ ЛИ СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ И МЕЖПЛАНЕТНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ?

Зинкин Д.В., Пилипенко В.А.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

E-mail: zinkin.deniz@yandex.ru

(устный доклад)

В геофизической литературе активно обсуждается возможность триггерного воздействия солнечной активности и связанных с ней возмущений космической погоды на сейсмичность Земли [Козырева, Пилипенко, 2020; Новиков, Сорокин, 2024; Сычева и др., 2011; Тарасов и др., 1999]. Была предпринята попытка проверить идею о солнечных вспышках и межпланетных ударных волнах как триггере планетарной сейсмической активности. Методом наложенных эпох (МНЭ) рассмотрена статистика землетрясений разных классов на освещенной стороне Земли до и после солнечных вспышек и межпланетных ударных волн 2000–2020 гг. Статистически значимых изменений сейсмичности не обнаружено. Полученные результаты ставят под сомнение гипотезу о солнечной вспышке или импульсе внезапного начала магнитной бури как возможных триггерах землетрясений.

Литература

- Козырева О.В., Пилипенко В.А. О взаимосвязи геомагнитной возмущенности и сейсмической активности для региона Аляски // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 33–49. DOI: [10.21455/gr2020.1-3](https://doi.org/10.21455/gr2020.1-3) EDN: [CBXVHU](https://www.edn.ru/CBXVHU)
- Новиков В.А., Сорокин В.М. Электромагнитные триггерные эффекты в системе «ионосфера-атмосфера-литосфера» и их возможное использование для краткосрочного прогноза землетрясений // Физика Земли. 2024. № 5. С. 97–112. DOI: [10.31857/S0002333724050078](https://doi.org/10.31857/S0002333724050078) EDN: [EJWLDI](https://www.edn.ru/EJWLDI)
- Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н. О геоэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума // Физика Земли. 2011. № 3. С. 55–71. EDN: [NDIXCP](https://www.edn.ru/NDIXCP)
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 152–160. EDN: [UPVGPM](https://www.edn.ru/UPVGPM)

DO SOLAR FLARES AND SUDDEN STORM COMMENCEMENTS TRIGGER EARTHQUAKES?

Zinkin D.V., Pilipenko V.A.

Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

E-mail: zinkin.deniz@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ОЧАГОВ СУБДУКЦИОННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Игнатьев Д.А.¹, Владимирова И.С.^{1,2}

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

E-mail: ignatev.da@ocean.ru

(устный доклад)

В работе представлены методы автоматизированного определения геометрических параметров очагов субдукционных землетрясений с использованием машинного обучения и статистического моделирования. Апробация методов проводилась на примере трех сильных землетрясений, произошедших в Японской, Чилийской и Алеутской зонах субдукции. Задача разделялась на два этапа. На первом этапе проводилось моделирование профиля зоны Вадати-Беньофа как зависимости глубины гипоцентра от расстояния до океанического желоба с использованием методов регрессионного анализа: метода наименьших квадратов (МНК) и робастной регрессии Хубера (рис. 1). В отличие от классического МНК, чувствительного к выбросам, метод Хубера сочетает квадратичную и линейную функции потерь, что критично в случае неточного определения глубин гипоцентров, и обеспечивает устойчивость результатов.

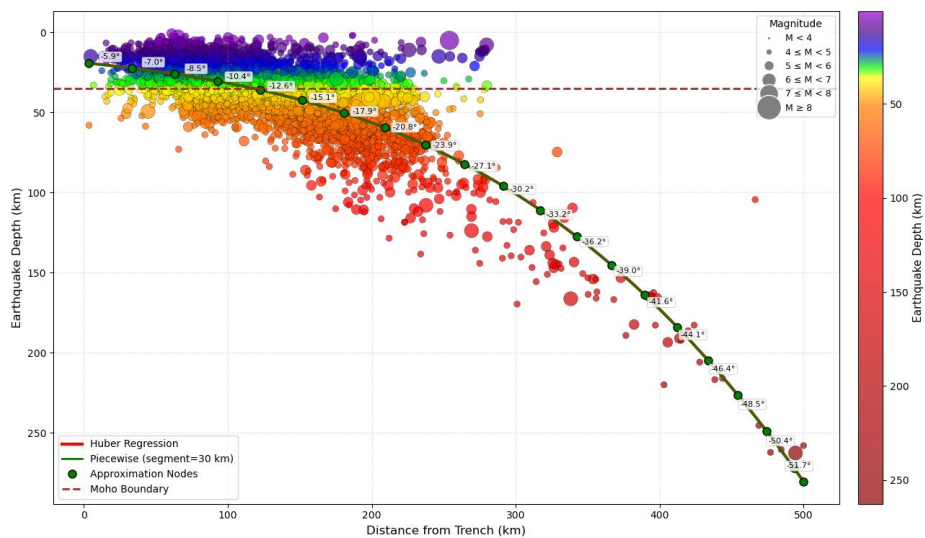


Рис. 1. Профиль Чилийской зоны субдукции, определенный с помощью метода Хубера

На втором этапе линейные размеры очага оценивались по площади облака афтершоков, ассоциируемого с размером разрыва основного толчка. Применялся кластерный анализ в пространственно-временной области на основе метрик ближайших соседей (NND) [Zaliapin, Ben-Zion, 2013], разделяющий события на кластеры (афтершоки) и фон. Пороги определялись законом Омори для времени [Гульельми и др., 2023] и эмпирическими расстояниями для пространства [Zaliapin, Ben-Zion, 2013]. Метод NND превосходит оконные подходы за счет учета статистических зависимостей, подобно вероятностным методам,

например, методу ОР-окна [Писаренко, Родкин, 2019], который нормирует расстояния с учетом магнитуды и локальной сейсмичности. На рис. 2 приведен результат работы метода NND для землетрясения Мауле 2010 г. ($M_w = 8.8$, Чилийская зона субдукции). Предложенные алгоритмы позволяют осуществлять автоматизированное определение геометрических параметров очагов субдукционных землетрясений, при этом превосходя традиционные методы в скорости и точности.

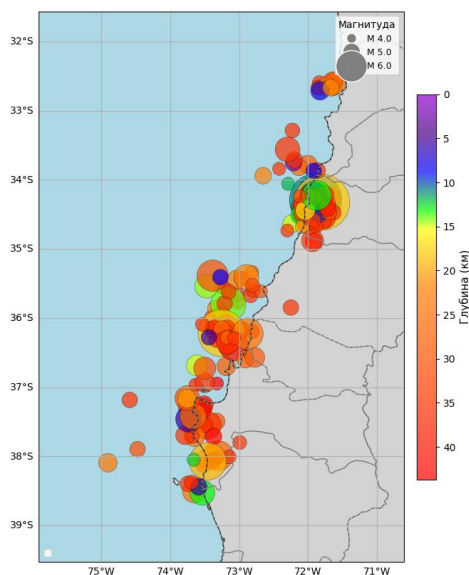


Рис. 2. Афтершоки землетрясения Мауле, выделенные с помощью метода NND

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0018).

Литература

- Гульельми А.В., Зотов О.Д., Завьялов А.Д., Клайн Б.И. О фундаментальных законах физики землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2023. № 5. С. 84–94. DOI: [10.31857/S0203030623700219](https://doi.org/10.31857/S0203030623700219) EDN: [WQRICG](https://www.edn.ru/WQRICG)
- Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Декластеризация потока сейсмических событий, статистический анализ // Физика Земли. 2019. № 5. С. 38–52. DOI: [10.31857/S0002-33372019538-52](https://doi.org/10.31857/S0002-33372019538-52) EDN: [XBUREH](https://www.edn.ru/XBUREH)
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2013. V. 118. P. 2847–2864. DOI: [10.1002/jgrb.50179](https://doi.org/10.1002/jgrb.50179) EDN: [KYWFCFA](https://www.edn.ru/KYWFCFA)

USING MACHINE LEARNING TO DETERMINE THE SOURCE GEOMETRY OF SUBDUCTION ZONE EARTHQUAKES

Ignatev D.A.¹, Vladimirova I.S.^{1,2}

¹ Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow

² Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

E-mail: ignatev.da@ocean.ru

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В РАЙОНЕ ЖЕЛОБА НАНКАЙ (ЯПОНИЯ) ПО ДАННЫМ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ

Кафтан В.И.¹, Мельников А.Ю.², Докукин П.А.²

¹ Геофизический центр РАН, г. Москва

² Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва

E-mail: v.kaftan@gcras.ru

(устный доклад)

Японский архипелаг представляет собой территорию высочайшей сейсмической активности. По данным Национальной геологической службы США с начала прошлого столетия в районе архипелага произошло 10 сильнейших землетрясений магнитудой $M > 8$. Это составляет около 10% от общего числа землетрясений мира за историю наблюдений в таком же диапазоне магнитуд [<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>]. По качественной шкале Рихтера такие землетрясения относятся к классу катастрофических.

Местом ожидания очередного мегаземлетрясения официально считается область глубоководного желоба Нанкай, где предыдущее катастрофическое событие $M_w = 8.3$ произошло в 1946 году. В этом сейсмоопасном районе с 684 года нашей эры произошло 12 мегаземлетрясений. Примечательно, что зоны разрывов от 8 из 12 сильнейших землетрясений региона тяготеют к области п-ова Кии. Оценка вероятности возникновения здесь очередного мегаземлетрясения представляет сегодня высочайший интерес для научного сообщества и населения, которому угрожает такая опасность.

Для выявления мест, препятствующих перемещению ГНСС-станций под действием тектонических сил, мы используем характеристику дефицита внутренних горизонтальных движений (модулей вектора накопленного смещения) земной коры. В местах с минимальными значениями этой характеристики происходит накопление упругих деформаций, приводящее к землетрясениям. Для оценки этой характеристики использована сеть ГНСС западной части Японского архипелага с результатами ежесуточных определений координат за 2012–2025 гг. Временные ряды координат получены из архива Геодезической лаборатории Невады [Blewitt et al., 2018]. Первый вариант расчета с использованием только сухопутных ГНСС-станций показал, что в областях, ближайших к Нанкайскому желобу, отсутствуют аномалии дефицита движений. Ввиду того, что наземные станции ГНСС Японии удалены от желоба Нанкай на 100 и более километров, Департаментом гидрографии и океанографии Японии была построена сеть донных гидроакустических ГНСС-станций [Yokota et al., 2018], двадцать из них были использованы нами для уточнения полученных ранее результатов. Карта пространственного распределения мест дефицита внутренних движений по данным наземной и донной сетей ГНСС представлена на рисунке.

Поведение одной из станций донной сети нарушило предположение об отсутствии аномалий дефицита смещений вблизи желоба Нанкай. Данная аномалия обнаружена именно

вблизи (юго-восточнее) п-ова Кии, где прежде происходило большинство мегаземлетрясений. Кроме нее также выделяются места дефицита движений в море Хуга Нада и вблизи желоба Сагами. Единая вытянутая область минимума смещений вдоль осевой тектонической линии Японского архипелага рассматривается нами как зона потенциальной опасности возникновения землетрясений уровня M_6-7 , поскольку мегаземлетрясения закономерно происходили в акватории моря.

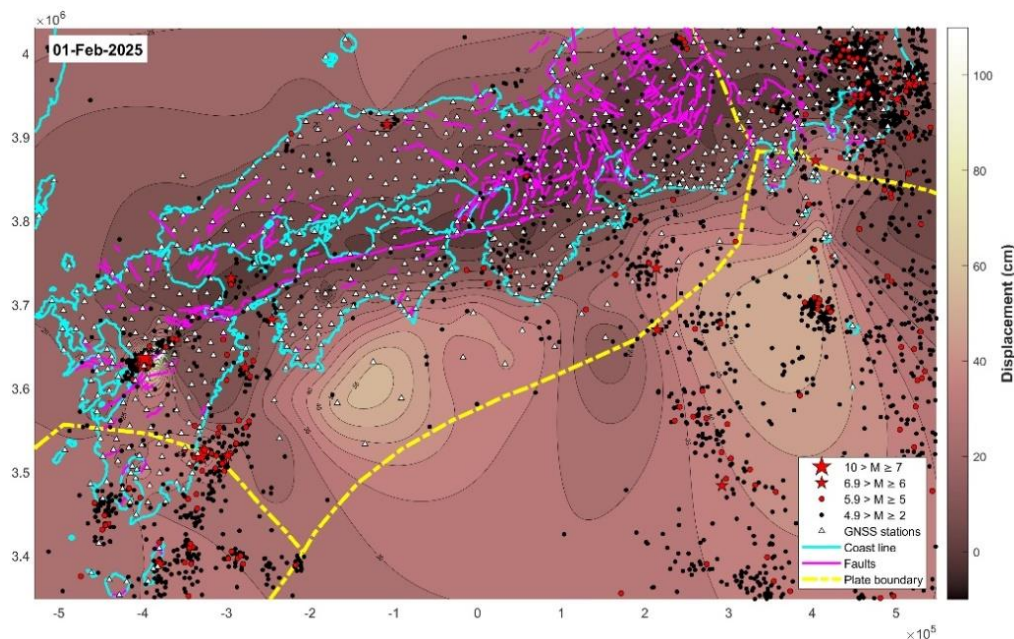


Рис. Накопление дефицита внутренних смещений 2009–2025 гг. Изолинии – значения модуля горизонтального смещения

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России (№075-01349-23-00).

Литература

- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C. Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science // *Eos*. 2018. V. 99. DOI: [10.1029/2018EO104623](https://doi.org/10.1029/2018EO104623)
- Yokota Y., Ishikawa T., Watanabe Si. Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations // *Scientific Data*. 2018. V. 5. 180182. DOI: [10.1038/sdata.2018.182](https://doi.org/10.1038/sdata.2018.182)

ASSESSMENT OF THE RISK OF A MEGATHRUST EARTHQUAKE IN THE NANKAI TROUGH AREA (JAPAN) USING GNSS OBSERVATIONS

Kaftan V.¹, Melnikov A.², Dokukin P.²

¹ Geophysical Center, RAS, Moscow

² Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

E-mail: v.kaftan@gcras.ru

КАКИЕ ПОМЕХИ НАИБОЛЕЕ ОПАСНЫ ДЛЯ DAS

Кислов К.В.¹, Гравиров В.В.^{1,2}

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

E-mail: kvkislov@yandex.ru

(стендовый доклад)

Помехи, искажающие данные DAS, можно разделить на шумы оборудования, оптоволоконного кабеля и внешние влияния. Интеррогаторы, производимые ведущими фирмами, такими как Silixa, T8 SENCOR, ПетроФайбер и др., – это высокоточные приборы, практически нечувствительные к внешним воздействиям и имеющие низкий собственный шум. Наиболее существенным источником помех у них является дрейф фазы лазера. Изменения фазы лазера прямо попадают в данные. Однако они сказываются одновременно на всех каналах, что позволяет значительно снизить влияние этого эффекта при обработке.

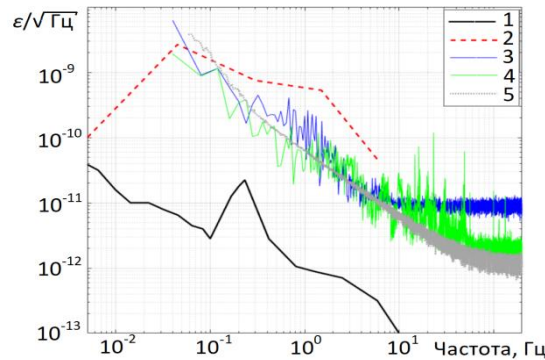


Рис. Оценки спектров шума DAS: 1 – соответствует NLNM; 2 – оценка для события М6 (на расстоянии 3000 км); 3 – экспериментальные данные интеррогатора «Дунай» (ООО «Т8 SENCOR») с лазером «RIO Orion Grade 4»; 4 – то же с лазером «Koheras Basik X-1»; 5 – численная модель при изменении температуры волокна $\sim 1^\circ\text{K/ч}$. [Никитин и др., 2023]

Сигнал DAS – продукт интерференции релеевского рассеяния на неоднородностях волокна со случайными фазовыми сдвигами. Таким образом, возникают каналы, где результирующий сигнал слаб (замирание). Изменения такого сигнала (полезная информация) не могут быть получены. Предложено много методов борьбы с этим, например, чирпирование импульса и др. [He et al., 2023]. Другие виды шумов (например, помехи при сигналах, изменяющихся быстрее, чем измеряется фаза) также успешно снижаются фирмами-производителями.

Передачу деформации грунт–кабель–волокно можно представить в виде своеобразного фильтра. Его характеристики определяются прокладкой и конструкцией кабеля, которая может быть в определенной степени учтена [Cappelli et al., 2025]. Сложнее обстоит дело с прокладкой. При одних и тех же параметрах прокладки связь кабеля с грунтом оказывает на сигнал пространственно изменчивое влияние, причем различия

в разы превышают величину регистрируемого сигнала.

Сами оптические волокна нечувствительны к изменениям атмосферного давления, влажности, электромагнитным полям. Однако изменения температуры прямо попадают на запись. Суточный ход температуры может быть легко отфильтрован. Но существуют изменения температуры в широком диапазоне частот, вызванные, например, изменениями инсоляции и аспирацией. Даже при нулевом уходе частоты лазера наблюдается низкочастотный шум, связанный с изменением температуры волокна (см. рис.). Для адаптивной фильтрации температурного шума используется параллельное применение DTS. Есть и другие методы – от одновременного использования двух волокон, одно из которых лежит свободно и малочувствительно к деформации, до использования глубоких нейронных сетей. Однако снизить влияние температуры до уровня других воздействий, особенно при использовании темных волокон коммуникационных кабелей, пока не удастся.

Количественно определить относительную значимость отдельных помех DAS не представляется возможным. Их влияние зависит от задачи, частотного диапазона, геометрии и способа прокладки и др. Но качественно их вполне можно ранжировать. Наиболее неопределенное влияние оказывает контакт волокна с грунтом. Таким образом, требуются дальнейшие работы по определению битых каналов, определению передаточных функций отдельных каналов и развитие корреляционных методов, отслеживающих прохождения сейсмических волн вдоль кабеля. Другим значимым фактором является изменение температуры. Здесь возможны как аппаратные решения, так и обработка сигнала. Сочетание различных методов шумоподавления и усиления слабых сигналов DAS является основным направлением в обработке сигналов DAS.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИТПЗ РАН и ИФЗ РАН.

Литература

- Никитин С.П., Кислов К.В., Старовойт Ю.О., и др. Возможности и перспективы использования распределенных оптоволоконных датчиков в геофизике // Приборы и техника эксперимента. 2023. № 5. С. 153–158. DOI: [10.31857/S0032816223050191](https://doi.org/10.31857/S0032816223050191) EDN: [ZVBDKA](https://www.edn.ru/ZVBDKA)
- Cappelli G., Murphy Sh., Arhant M., et al. Impact of Cable Structure on Distributed Fiber Optic Sensing // PREPRINT available at Research Square. 2025. DOI: [10.21203/rs.3.rs-6766946/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6766946/v1)
- He X., Cao Zh., Ji P., et al. Eliminating the Fading Noise in Distributed Acoustic Sensing Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2023. V. 61. P. 1–10. 5906510. DOI: [10.1109/TGRS.2023.3263159](https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3263159)

THE MOST SERIOUS NOISE FOR DAS

Kislov K.V.¹, Gravurov V.V.^{1,2}

¹ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

E-mail: kvkislov@yandex.ru

ГЕНЕРАЦИЯ ИСКУССТВЕННОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА: ПОДГОТОВКА МАЛОМОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Кислов К.В.¹, Марченков А.Ю.²

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Физический факультет, г. Москва

E-mail: kvkislov@yandex.ru

(стендовый доклад)

Маломощные импульсные источники (МИИ) используются для работ в трудно-доступных районах или районах со сложным рельефом, в условиях городской застройки, для учебных целей, а также при малобюджетных исследованиях.

Наиболее простой МИИ – кувалда. Энергия, передаваемая в грунт, зависит от веса кувалды (4–12 кг), длины рукояти (до 1 м), роста сотрудника и техники удара (рис. 1).



Рис. 1. Кистевой замах обеспечивает единообразие воздействий и экономит силы

Важны также вес подставки [Kim, Lee, 2011], ее площадь и форма. Обычно для всех условий берут одну подставку (600–900 см²). Ее форма может повлиять на азимутальное распределение энергии [Jeong, Kim, 2012]. Для единообразия воздействий была разработана подставка, устраняющая этот эффект (рис. 1, справа). Для сдвиговых волн [Возбуждение..., 1981] в грунте закрепляют подставки с ударной поверхностью, расположенной под углом, или крепят подставку на стенке закопушки. Мы проверим все варианты.

Неавтоматизированный подъем и сброс груза (весом 20–60 кг) обычно осуществляется с помощью треноги высотой до 5 метров. Мы изготовили треногу с устройством сброса груза и воротом на месте из доступных материалов (рис. 2). Главный недостаток – возможность повторного удара при отскоке груза. Для сдвиговых волн мы модифицировали треногу так, что стало возможным наносить боковые (маятниковые) удары по стенке закопушки.

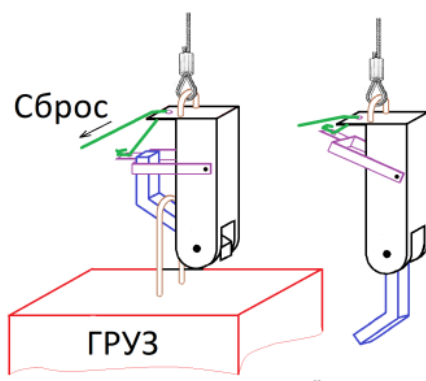


Рис. 2. Устройство сброса груза

Таблица. Сравнение эксплуатационных характеристик МИИ

	Кувалда	Сброс груза	Сейсморужье
Тип генерируемой волны*	L, S	L, S	L, S
Максимальное воздействие [кДж]	0.08	1.5	4
Вес [кг]	12	100	3
Дополнительное оборудование и инструмент	Подставка, лопата	Лопата	Ручной бур или мотобур
Самодельное изготовление [чел. × дн.]	-	7	30
Частота импульсов на одной точке возбуждения [с]	5	120	5
Время подготовки (монтаж, подготовка площадки, финишная уборка) [мин.]	5	30	5
Подготовка площадки	Выравнивание, удаление гумусного слоя на 10 см	Выравнивание, удаление гумусного слоя на 10 см	Бурение скважины, глубиной 0.5 – 2 м
Обслуживание источника [чел.]	1	1	1
Перемещение на другую точку [чел.]	1	3	1

Изготовление действующего макета сейсморужья не потребовало много времени и средств (см. табл.). Сейсморужье может быть использовано как с холостым, так и с дробовым зарядами. Для полного сгорания пороха и разрушения пыжа-обтюратора (холостой заряд) разработан патронник со съёмным сужением стволика. При воспламенении капсюля с помощью боевой пружины сила удара постоянна, и корпус сейсморужья легко удлинять до необходимой длины. Изготовлено также сейсморужье для горизонтальных выстрелов. Для сдвиговых волн возможны выстрелы в стенку обсадной трубы. Бывает, что в качестве МИИ используют выстрелы из охотничьего ружья в неглубокую скважину. Мы решили протестировать эти способы. Даже холостой выстрел может привести к серьезным травмам. Выстрелы из ружья просто в грунт надо исключить из практики. Так как при выстрелах в скважину бывают выбросы песка и мелких камней, необходимы защитные очки.

Подготовлен полный набор оборудования для проведения экспериментов по сравнению МИИ. Проведены испытания и оценка эксплуатационных характеристик.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИТПЗ РАН и Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Литература

- Возбуждение поперечных сейсмических волн импульсными источниками: Методические рекомендации / Н.Н. Пузырев (ред.). Новосибирск: Наука, 1981. 192 с.
- Jeong J.-H., Kim J.-H.* Comparison of Signal Powers Generated with Different Shapes of Hammer Plates // Journal of the Korean earth science society. 2012. V. 33. № 5. P. 395–400. DOI: [10.5467/JKESS.2012.33.5.395](https://doi.org/10.5467/JKESS.2012.33.5.395)
- Kim J.-H., Lee Y.-H.* Comparison of Signal Powers Generated with Metal Hammer Plate and Plastic Hammer Plate // Geophysics and Geophysical Exploration. 2011. V. 14. № 4. P. 282–288. DOI: [10.7582/GGE.2011.14.4.282](https://doi.org/10.7582/GGE.2011.14.4.282) (на корейском)

ACTIVE SEISMIC SOURCES: PREPARATION FOR COMPARATIVE EXPERIMENTS

Kislov K.V.¹, Marchenkov A.Yu.²

¹ *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow*

² *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow*

E-mail: kvkislov@yandex.ru

РАДОНОВЫЙ МОНИТОРИНГ В КРАТКОСРОЧНОМ ПРОГНОЗЕ ВРЕМЕНИ И МЕСТА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К.

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, г. Екатеринбург

E-mail: ikozlova75@mail.ru

(устный доклад)

Представлены результаты радонового мониторинга на о. Кунашир в период 2011–2024 гг. Анализ многолетнего непрерывного ряда наблюдений объемной активности почвенного радона (ОАР) показал наличие причинно-следственной связи между землетрясениями и вариациями ОАР. Рассматривались сейсмические события с магнитудой более 4, произошедшие на расстоянии не более 500 км от пункта наблюдений [Козлова и др., 2021]. В методике прогнозирования используется соотношение магнитуды к логарифму расстояния между эпицентром события и пунктом наблюдения [Добровольский, 1991]. Всего за указанный промежуток времени произошло 289 землетрясений с магнитудой более 4.0, и 267 из них отразились в кривых ОАР.

На большом фактическом материале установлено, что ближние и дальние землетрясения (относительно точки наблюдения) отражаются на разных участках кривой ОАР, и определены ближняя зона (зона сжатия) и дальняя зона (зона растяжения). Ближние землетрясения отражаются на кривой ОАР после выхода аномалии на фоновый уровень в интервале времени до 28 суток. Дальние землетрясения отражаются на кривой ОАР после максимума аномалии на нисходящей ветви в интервале времени до 6 суток. Для Южно-Курильского полигона (зона субдукции) радиус ближней зоны R_2 (зона сжатия) составил менее 130 км, радиус дальней зоны R_1 (зона растяжения) – более 180 км.

На основе полученных результатов авторами предложен способ краткосрочного прогноза времени и места землетрясений [Козлова и др., 2025], включающий измерение объемной активности почвенного радона в режиме непрерывной откачки из шпуров не менее, чем в 4 точках наблюдения вокруг контролируемого объекта, разнесенных друг от друга на радиус дальней зоны (R_1). В случае появления аномалии ОАР на любой точке наблюдения отслеживается появление аномалии на оставшихся точках. При обнаружении аномалии ОАР на любой из оставшихся точек делают вывод о возможном землетрясении в течение 0–6 суток, начиная с момента прохождения максимума аномалии ОАР на этой точке, в области, ограниченной радиусом ближней зоны (R_2) с центром в точке, где появилась первая аномалия.

Физической основой предлагаемого способа служит причинно-следственная связь между процессами сжатия и растяжения, которые разным образом влияют на пористость

и проницаемость горных пород. Растяжение в одной области вызывает компенсационное сжатие в другой. Соответственно снятие сжимающих напряжений при деструктивных процессах в очаге в момент землетрясения или незадолго до него вызовет снятие (на какое-то время) растягивающих напряжений за пределами очага (в дальней зоне). Это приводит к возвращению проницаемости к исходному уровню, соответственно, уменьшению объема пор, за счет чего радон выдавливается в сообщающуюся часть порового пространства. Землетрясение при наблюдении ОАР в зоне растяжения (дальней зоне) отражается на кривой ОАР в интервале времени от ее максимума до 6 суток после него. Таким образом, начавшийся деструктивный процесс в очаге вызывает аномалию ОАР в зоне растяжения (дальней зоне). Контролируя изменения ОАР в дальней зоне и считая, что аномалия связана с процессом разрушения в очаге, мы можем давать прогноз по времени в пределах 6 суток, считая от прохождения максимума аномалии.

Предлагаемый способ позволяет получить количественные характеристики времени проявления ожидаемого землетрясения относительно реперных точек кривой ОАР и оценить пространственное положение области эпицентра. Применение способа целесообразно при защите мегаполисов и опасных объектов, расположенных в сейсмоактивных регионах, при условии получения положительных результатов его апробирования в реальных условиях.

Литература

- Добровольский И.П.* Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 224 с.
- Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К.* Поведение аномалий объёмной активности почвенного радона во время подготовки тектонических землетрясений // Литосфера. 2021. Т. 21. № 5. С. 724–733. DOI: [10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733](https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733) EDN: [LZNTCK](https://www.edn.ru/1ZNTCK/)
- Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К.* Способ определения времени и места землетрясения. Патент РФ на изобретение № 2839307. Заяв. 03.05.2024. Оpubл. 29.04.2025.

RADON MONITORING IN SHORT-TERM FORECAST OF EARTHQUAKE TIME AND LOCATION

Kozlova I.A., Biryulin S.V., Yurkov A.K.

Institute of Geophysics, UB RAS, Ekaterinburg

E-mail: ikozlova75@mail.ru

ЭМПИРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ УРОВНЕМ СПЕКТРА УСКОРЕНИЙ, ТЕКТОНИЧЕСКИМ ТИПОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И СЕЙСМИЧЕСКИМ МОМЕНТОМ

Коновалов А.В., Степнова Ю.А.

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

E-mail: a.kononov@geophystech.ru

(устный доклад)

Очаг землетрясения в структурном плане представляет собой дискретный набор прочных пятен (asperity/SMGA) на относительно малопрочной поверхности разрыва. Прочные пятна являются источниками высокочастотного некогерентного излучения, на них в процессе распространения фронта разрыва высвобождается основная (высокочастотная) сейсмическая энергия, представляющая опасность для зданий и сооружений.

Ключевым измеряемым параметром, отождествляемым с пятнами прочности, является высокочастотный (короткопериодный) уровень очагового спектра ускорений. Реконструкция очагового спектра чаще всего подразумевает оценку низкочастотного спектра смещений, определяющего важнейшую физическую характеристику – скалярный сейсмический момент очага землетрясения. Однако особый интерес в задачах инженерной сейсмологии представляет оценка спектра ускорений в целом и параметризация его высокочастотного уровня. Важным моментом является использование накопленных данных для исследования скейлинга между высокочастотными и низкочастотными характеристиками спектра.

В настоящей работе для параметризации высокочастотного уровня спектра ускорений используется моментная магнитуда, а также дополнительные предикторы в виде категориальных переменных, описывающих тектонический тип землетрясения, его механизм очага и региональные особенности. Разработанная модель связывает указанные параметры в виде среднемирового эмпирического соотношения. Для этого использовались опубликованные данные, полученные в различных сейсмоактивных районах Земли. Результаты проведенного исследования позволяют ранжировать уровень сейсмических воздействий для различных геодинамических условий, реализованных на территории России.

В работе также рассматриваются эффекты направленности высокочастотного излучения и их влияние на спектральные оценки на примере землетрясения 2024 г. ($M_w = 7.5$) в районе полуострова Ното, Япония.

EMPIRICAL RELATIONSHIPS BETWEEN THE HIGH-FREQUENCY LEVEL OF THE ACCELERATION SPECTRUM, THE TECTONIC TYPE OF EARTHQUAKE, AND THE SEISMIC MOMENT

Kononov A.V., Stepnova Yu.A.

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok

E-mail: a.kononov@geophystech.ru

МИФЫ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ: КАМО ГРЯДЕШИ?

Кособоков В.Г.^{1,2,3}, Некрасова А.К.¹

¹ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*

² *Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Roma, Italy*

³ *International Seismic Safety Organization, Arsita, Italy*

E-mail: volodya@mitp.ru

(устный доклад)

Мы живём в мире чисел и расчётов с огромным количеством довольно быстрого и удобного программного обеспечения, применение которого может привести к открытию или, наоборот, к заблуждениям, ложным выводам, ошибочным заявлениям и прогнозам. Сегодня Наука может раскрывать природные опасности, оценивать риски и предоставлять передовые знания о надвигающихся катастрофах заранее, а также полезные рекомендации по уровню рисков для инженерного проектирования, страхования и управления в чрезвычайных ситуациях. Наука не может избавить людей от склонности к иллюзиям, а также от политического отрицания, невежества и халатности, что подтверждается проверкой нескольких мифов о землетрясениях на практике.

Внезапность, кажущаяся нерегулярность и редкость землетрясений способствуют формированию общего представления о том, что землетрясения непредсказуемы. Многие не различают термины «непредсказуемый», «случайный» и «бессистемный», хотя это различие имеет решающее значение для научных выводов, направленных на снижение последствий катастрофических землетрясений. Сейсмические данные отрицают свою случайность.

Землетрясения группируются. Предположение о пуассоновском распределении повторяемости землетрясений (и даже их «главных толчков») опровергается статистикой наблюдений. Утверждения о предпочтительных днях календарного года или лунного цикла для великих землетрясений с магнитудой $M \geq 8$ также не достоверны. Проверка ряда гипотез [Kossobokov, Panza, 2020] позволяет утверждать, что (i) влияние положения Земли относительно Солнца или Луны на возникновение землетрясений является сложным и вряд ли может спровоцировать землетрясения с магнитудой $M \geq 7.5$; однако (ii) значительный процент землетрясений с магнитудой $M \geq 6$ может быть связан с приливным воздействием; (iii) не существует предпочтительного для землетрясений расстояния до Луны; (iv) в Северном полушарии очевидна сезонная закономерность и (v) применение непараметрического теста Койпера к ряду выборок землетрясений предполагает существование нечеткого, специфичного для конкретного региона верхнего предела влияния Солнца и Луны на сейсмический режим в диапазоне около магнитуды 7 или меньше.

Последовательности землетрясений не случайны, а скорее не имеют какого-либо очевидного принципа организации. Общий закон подобия для землетрясений, обобщающий фундаментальное соотношение Гутенберга – Рихтера, учитывает фрактальные свойства распределения землетрясений [Kossobokov, 2021], однако при этом его три коэффициента не

связаны какой-либо очевидной общей корреляцией, хотя, при региональном рассмотрении, формируют хорошо организованный аттрактор в области возможных значений [Nekrasova et al., 2011]. Более того, наблюдаемая высокая изменчивость наблюдаемой корреляции между геодезическими и сейсмическими интегралами, по-видимому, указывает лишь на частичный вклад землетрясений в целом асейсмичное, хотя и, по-видимому, спорадическое движение небольших литосферных блоков [Liu, Kossobokov, 2021].

Многие исследователи совершают довольно распространённую ошибку, считая, что модель статистически «проверена» или «доказана», когда тестовая статистика попадает в разумную часть распределения. Наилучший тестовый результат модели не гарантирует её адекватности реальному процессу, даже если она «лучшая» среди доступной выборки многих нереалистичных моделей. Применение оценок вероятности, неопределённости, эпистемической и/или алеаторной ошибки не гарантирует получения адекватных результатов при автоматическом использовании «всех» данных и «наилучших доступных» процедур. Очевидно, что не всякая неопределённость может быть представлена в виде вероятности и не все вероятности могут быть хорошо оценены [Stark, 2022].

Так что же ждет Науку, если Научное сообщество продолжит верить в распространённые мифы об окружающем нас мире?

Литература

- Kossobokov V. Unified Scaling Law for Earthquakes that Generalizes the Fundamental Gutenberg-Richter Relationship // Encyclopedia of Earth Sciences Series. Geophysics / Gupta H.K. (ed.). Cham: Springer, 2021. P. 1893–1896. DOI: [10.1007/978-3-030-58631-7_257](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58631-7_257)
- Kossobokov V.G., Panza G.F. A Myth of Preferred Days of Strong Earthquakes? // Seismological Research Letters. 2020. V. 91. P. 948–955. DOI: [10.1785/0220190157](https://doi.org/10.1785/0220190157) EDN: [SDJDTW](https://www.edn.org/SDJDTW)
- Liu T., Kossobokov V.G. Displacements Before and After Great Earthquakes: Geodetic and Seismic Viewpoints // Pure and Applied Geophysics. 2021. V. 178. P. 1135–1155. DOI: [10.1007/s00024-021-02694-2](https://doi.org/10.1007/s00024-021-02694-2) EDN: [RPKWMW](https://www.edn.org/RPKWMW)
- Nekrasova A., Kossobokov V., Peresan A., Aoudia A., Panza G.F. A Multiscale Application of the Unified Scaling Law for Earthquakes in the Central Mediterranean Area and Alpine Region // Pure and Applied Geophysics. 2011. V. 168. P. 297–327. DOI: [10.1007/s00024-010-0163-4](https://doi.org/10.1007/s00024-010-0163-4) EDN: [OHTZKT](https://www.edn.org/OHTZKT)
- Stark P.B. Pay no attention to the model behind the curtain // Pure and Applied Geophysics. 2022. V. 179. P. 4121–4145. DOI: [10.1007/s00024-022-03137-2](https://doi.org/10.1007/s00024-022-03137-2) EDN: [AYSCGY](https://www.edn.org/AYSCGY)

MYTHS ABOUT EARTHQUAKES: QUO VADIS?

Kossobokov V.G.^{1,2,3}, Nekrasova A.K.¹

¹ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

² Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Roma, Italy

³ International Seismic Safety Organization, Arsita, Italy

E-mail: volodya@mitp.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ГЕОМЕХАНИКИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ СЕЙСМОЛОГИИ

Кочарян Г.Г., Беседина А.Н., Остапчук А.А.

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

E-mail: kocharyan.gg@idg.ras.ru

(пленарный доклад)

В докладе изложены представления авторов, составляющие основу развиваемой в ИДГ РАН концептуальной модели процесса возникновения и развития динамической неустойчивости тектонических разломов. Кратко рассмотрены физические процессы, лежащие в основе последовательных стадий возникновения неустойчивости, их влияние на характеристики процесса скольжения, источники получения исходных данных для аналитических и численных моделей.

Интенсивное развитие в последние годы наблюдательных технологий, методов математического моделирования, техники лабораторного эксперимента позволили установить, детализировать и количественно описать целый ряд важных процессов, происходящих в очаговой области, таких, как формирование структуры зоны скольжения и областей разной степени нарушенности, эволюция характеристик участков с разными фрикционными свойствами и давлениями флюида на межсейсмической и косейсмической стадиях, условия возникновения разрывов с малыми и аномально высокими скоростями распространения и т.д. Подходы к описанию процесса подготовки и инициирования разрыва стали все больше основываться на фундаментальных научных принципах, таких как понимание физики источника, моделирование сейсмогенного и асейсмического скольжения, процесса накопления напряжений и т.д. [Кочарян, 2021; Кочарян и др., 2023].

В основе современных геомеханических моделей лежат представления о гетерогенности разломных зон – их отличии от планарности, существовании участков с различными фрикционными свойствами. Накопленные знания позволяют перейти к решению амбициозной задачи построения расчетной модели, адекватно описывающей процессы подготовки и инициирования различных мод скольжения, по сути дела, к «цифровой модели» области в окрестности очага будущего разрыва. Ясно, что подобная модель должна состоять из нескольких взаимосвязанных субмоделей и отражать следующие основные положения:

(i) Сведения о структуре сейсмогенных разломных зон: локализация скольжения в узких зонах, неоднородность интерфейса, наличие участков с разной геометрией.

(ii) Расположение запертых участков (*asperities*), участков эпизодов медленного скольжения и крипа определяется по данным геодезии (крупные участки) и сейсмического мониторинга.

(iii) При моделировании для *asperities* и промежутков между ними используются разные законы трения. Фрикционные свойства разных участков разломной зоны проявляются в очаговых характеристиках микросейсмических событий.

(iv) Различные сценарии заключительной стадии подготовки динамического срыва – каскадная и *preslip* модели. Их признаки проявляются в характере форшокового процесса и/или в характеристиках низкочастотной области микросейсмического фона (смещение частоты спектрального центроида).

(v) Характер скольжения (тип реализации накопленной упругой энергии) определяется гетерогенностью интерфейса – наличием контактных пятен (*asperities*) и их взаимным расположением, фрикционными свойствами, Р-Т условиями.

(vi) Распространение разрыва. После старта разрыв либо затухает, либо распространяется вдоль поверхности скольжения. Сценарий развития разрыва определяется размером участка инициирования, взаиморасположением *asperities*, законами трения, параметрами НДС и при моделировании выбирается на основе структурной модели. От реализации того или иного сценария зависит сейсмическая эффективность землетрясения (доля энергии, излученной в виде сейсмических волн).

Исследование выполнено при поддержке РНФ, грант № 22-17-00204-П.

Литература

- Кочарян Г.Г. Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса // Физика Земли. 2021. № 4. С. 3–41. DOI: [10.31857/S0002333721040062](https://doi.org/10.31857/S0002333721040062) EDN: [VVHLOY](https://www.edn.ru/vvhloy)
- Кочарян Г.Г., Беседина А.Н., Гридин Г.А., Морозова К.Г., Остапчук А.А. Трение как фактор, определяющий излучательную эффективность подвижек по разломам и возможность их инициирования. Состояние вопроса // Физика Земли. 2023. № 3. С. 3–32. DOI: [10.31857/S0002333723030067](https://doi.org/10.31857/S0002333723030067) EDN: [JZZKZN](https://www.edn.ru/jzzkzn)

GEOMECHANICS OF FAULTS IN SOLVING SEISMOLOGICAL PROBLEMS

Kocharyan G.G., Besedina A.N., Ostapchuk A.A.

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, RAS, Moscow

E-mail: kocharyan.gg@idg.ras.ru

ГИС-ПРОЕКТ ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ОБЩЕГО ЗАКОНА ПОДОБИЯ ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ПРИБАЙКАЛЬЕ

Кревсун Д.А.^{1,2}, Некрасова А.К.¹, Прохорова Т.В.¹

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Геологический факультет, г. Москва

E-mail: dasha@krevsun.ru

(стендовый доклад)

В данном исследовании представлен проект для анализа региональной сейсмической опасности (СО), реализованный в QGIS для территории Прибайкалья. Решения Web-GIS проекта основаны на технологиях с открытым исходным кодом и реализованы с использованием как настольных, так и серверных компонентов QGIS. Хранение данных осуществляется с помощью геобаз данных SpatiaLite, которые просты в администрировании без дополнительных зависимостей или установок.

Цель проекта – предоставить интерактивный инструмент для оценки, визуализации, верификации и анализа сейсмической опасности в районе озера Байкал с использованием подхода Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ), который обобщает закон Гутенберга–Рихтера [Kossobokov, Mazhkenov, 1994; Kossobokov, 2021].

Проект реализован в пределах 50° – 58° с.ш. и 98° – 122° в.д. и состоит из трех компонент: (i) идентификация потенциальных сейсмических источников, (ii) моделирование сейсмического воздействия и построение карт СО, (iii) верификация и сравнение полученных карт с картами, построенными на основе вероятностного подхода к оценке СО.

(i) Идентификация сейсмических источников использует ранее опубликованные значения коэффициентов ОЗПЗ [Nekrasova, Kossobokov, 2022; 2023]. Для каждой ячейки j регулярной сетки $1/8^{\circ} \times 1/8^{\circ}$, в которой есть надежное определение коэффициентов A , B и C , где A и B соответствуют коэффициентам a и b в законе Гутенберга–Рихтера, а коэффициент C отражает локальную фрактальную размерность распределения эпицентров, ожидаемое число землетрясений магнитуды M_j за период времени T лет определяется как $N_T(M_j) = T \times N(M_j, L_0)$. Максимальная достоверная магнитуда (МДМ) определяется как наибольшая магнитуда M_j , удовлетворяющая условию $N_T(M_j) \geq p$, где $0 \leq p \leq 1$. Ячейки сетки при этом рассматриваются как источники сейсмической интенсивности с МДМ (см. рис.).

(ii) Моделирование сейсмического воздействия от каждого источника выполнено на основе быстрого приближённого метода [Nekrasova, Kossobokov, 2022], учитывающего МДМ и анизотропное распространение воздействия. Основное направление воздействия определяется доминирующим простиранием системы активных разломов региона. Доминирующее простирание определяется автоматически [Емельянов, Некрасова, 2022] для

каждого источника с МДМ на основе базы данных активных разломов [Bachmanov et al., 2022]. В результате строятся карты ожидаемой максимальной макросейсмической интенсивности на 50-летний период для вероятностей превышения 10%, 5% и 1%.

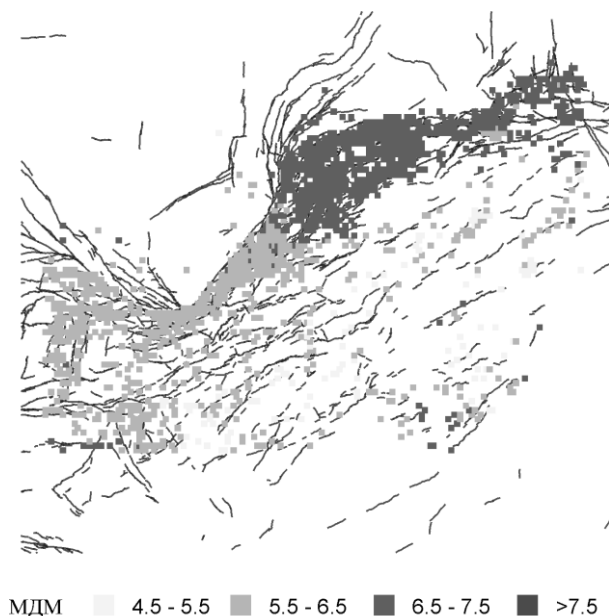


Рис. Схема активных разломов Прибайкалья [Bachmanov et al., 2022] и ячейки МДМ, 10% превышения в 50 лет, определенные на основе коэффициентов ОЗПЗ [Nekrasova, Kossobokov, 2022, 2023]

(iii) *Верификация и сравнение.* Полученные карты СО сопоставляются с картами Общего сейсмического районирования (ОСР-2016) [Завьялов и др., 2018] и картами на основе глобальной модели СО – GEM-2018 [Pagani et al., 2020]. Дополнительно проводится валидация построенных карт данными Унифицированного каталога землетрясений [Специализированный каталог..., 2014], включающего 124 события ($M \geq 5.5$), зарегистрированных в Байкальском регионе до 2013 г. Данные Унифицированного каталога, относящиеся к территории проекта, и фрагменты карт ОСР-2016 и GEM-2018 интегрированы в проект.

Плагины QGIS, обеспечивающие расчёты и визуализацию карт СО представленного проекта, могут быть использованы для построения таких карт в других регионах России и мира, где доступны надёжные оценки коэффициентов ОЗПЗ и имеются данные об активных разломах. Разработанная система предназначена как для научных исследований, так и для практического применения органами, ответственными за управление рисками и чрезвычайными ситуациями, обеспечивая поддержку принятия решений в сейсмоактивных регионах.

Литература

Емельянов И.В., Некрасова А.К. DDLAFS – плагин QGIS для оценки доминирующих направлений системы локальных активных разломов // Геоинформатика. 2022. № 4. С. 54–62. DOI: [10.47148/1609-364X-2022-4-54-62](https://doi.org/10.47148/1609-364X-2022-4-54-62) EDN: [ZGKAZJ](https://www.edn.ru/2022-4-54-62)

- Завьялов А.Д., Перетокин С.А., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Акатова К.Н. Общее сейсмическое районирование: от карт ОСР-97 к картам ОСР-2016 и картам нового поколения в параметрах физических характеристик: научное издание // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 45. № 4. С. 47–68. DOI: [10.21455/VIS2018.4-4](https://doi.org/10.21455/VIS2018.4-4) EDN: [YZACST](https://www.edn.ru/yzacst/)
- Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации / В.И. Уломов, Н.С. Медведева (ред.). М.: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2014. URL: <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Earthquake-Catalog-CK3.pdf>
- Bachmanov D., Trifonov V., Kozhurin A., Zelenin E. Active Faults of Eurasia Database AFEAD v2022. 2022. DOI: [10.13140/RG.2.2.25509.58084](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25509.58084)
- Kossobokov V. Unified Scaling Law for Earthquakes that Generalizes the Fundamental Gutenberg-Richter Relationship // Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series / Gupta H.K. (ed.). Cham: Springer, 2021. P. 1893–1896. DOI: [10.1007/978-3-030-58631-7_257](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58631-7_257)
- Kossobokov V.G., Mazhkenov S.A. On similarity in the spatial distribution of seismicity // Computational seismology and geodynamics / Chowdhury D.K., Biswas N.N., et al. (eds.). American Geophysical Union, 1994. V. 1. P. 6–15. DOI: [10.1029/CS001p0006](https://doi.org/10.1029/CS001p0006)
- 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. 2023. V. 116. № 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 Lake Baikal Unified Scaling Law for Earthquake Regional Coefficients // Problems of Geocosmos–2020. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences / Kosterov A., Bobrov N., Gordeev E., Kulakov E., Lyskova E., Mironova I. (eds.). Cham: Springer, 2022. P. 253–261. DOI: [10.1007/978-3-030-91467-7_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_17)
- Pagani M., Garcia-Pelaez J., Gee R., et al. The 2018 version of the Global Earthquake Model: Hazard component // Earthquake Spectra. 2020. V. 36. № 1_suppl. P. 226–251. DOI: [10.1177/8755293020931866](https://doi.org/10.1177/8755293020931866)

GIS-BASED PROJECT FOR SHA USING THE UNIFIED SCALING LAW FOR EARTHQUAKES: LAKE BAIKAL REGION

Krevsun D.A.^{1,2}, Nekrasova A.K.¹, Prokhorova T.V.¹

¹ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

² Lomonosov Moscow State University, Geology Department, Moscow

E-mail: dasha@krevsun.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ МОРСКИХ РЕГИОНОВ

Крылов А.А.^{1,2}

¹ Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, г. Москва

² НТУ «Сириус», федеральная территория «Сириус»

E-mail: artyomkrlyv@ocean.ru

(устный доклад)

При оценке сейсмической опасности морских регионов специалисты сталкиваются с необходимостью соответствующей адаптации существующих инструментальных и расчетных методов, которые изначально применялись для континентальных территорий. Такая необходимость обусловлена, прежде всего, недостатком геолого-геофизических и сейсмологических данных ввиду отдаленности большинства морских регионов России (особенно арктических), сложных климатических условий, высокой стоимостью и техническими сложностями проведения морских и береговых экспедиционных наблюдений.

Кроме того, инженерные сейсмологические исследования в акваториях требуют особого внимания к вторичным эффектам, индуцируемых сейсмичностью. К их числу относятся подводные оползни и турбидитные потоки, разжижение грунтов, выход газа из морских осадков, генерация цунами.

Для проведения детального сейсмологического мониторинга в акваториях применяются донные сейсмографы. В частности, в 2018–2022 гг. был выполнен ряд краткосрочных и длительных постановок донных сейсмостанций в арктических морях России. Были изучены и описаны регистрационные возможности аппаратуры, и разработаны схемы их постановки в условиях арктических морей. Исследованы особенности донных сейсмических шумов, что необходимо для эффективного обнаружения сигналов от слабых событий [Krylov et al., 2023].

Для моря Лаптевых изучены особенности распределения очагов землетрясений, определены основные геодинамические режимы и ориентация осей напряжений [Крылов и др., 2023]. Землетрясения, зарегистрированные донными сейсмостанциями, повышают полноту регионального сейсмического каталога, необходимого при разработке модели зон возникновения землетрясений при детальном сейсмическом районировании. Донные сейсмические шумы могут использоваться для определения глубины контрастной отражающей границы в верхней части геологического разреза методом HVSR [Krylov et al., 2022a] в рамках сейсмического микрорайонирования в акваториях. Расчетные методы оценки такого влияния также требуют адаптации к применению для акваторий – разработан алгоритм моделирования сейсмического отклика пористых насыщенных грунтов, характерных для шельфа [Krylov et al., 2022b].

Анализ взаимного распределения активных разломов, очагов землетрясений и известных механизмов очагов в море Лаптевых выявил высокую вероятность влияния напряженно-деформированного состояния коры и сеймотектонической активности на состояние подводной мерзлоты и массированные выбросы метана из морских осадков. Было продемонстрировано, что землетрясения и мощная разгрузка газа из осадочной толщи могут служить триггерными механизмами, которые провоцируют обрушение склонов серии каньонов в центральной части континентального склона моря Лаптевых к востоку от оси хребта Гаккеля с формированием оползневых потоков [Baranov *et al.*, 2025].

Полученные результаты могут быть использованы на практике при детальном сейсмическом районировании и микрорайонировании обширных морских акваторий России.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00125.

Литература

- Крылов А.А., Лобковский Л.И., Ковачев С.А., Баранов Б.В., Рукавишников Д.Д., Цуканов Н.В., Дозорова К.А., Семилетов И.П. Геодинамические режимы в Лаптевоморском регионе согласно новейшим сейсмологическим данным // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 513. № 2. С. 224–230. DOI: [10.31857/S2686739723601783](https://doi.org/10.31857/S2686739723601783) EDN: [ZPSWAH](https://www.edn.ru/entry/ZPSWAH)
- Baranov B.V., Krylov A.A., Rukavishnikova D.D., Dozorova K.A., Lobkovsky L.I. Landslide Processes in the Central Part of the Laptev Sea Continental Slope and Their Relation to Tectonics // Doklady Earth Sciences. 2025. V. 523. 12. DOI: [10.1134/S1028334X25606522](https://doi.org/10.1134/S1028334X25606522) EDN: [YPRXHT](https://www.edn.ru/entry/YPRXHT)
- Krylov A.A., Kulikov M.E., Kovachev S.A., Medvedev I.P., Lobkovsky L.I., Semiletov I.P. Peculiarities of the HVSR Method Application to Seismic Records Obtained by Ocean-Bottom Seismographs in the Arctic // Applied Sciences. 2022a. V. 12. 9576. DOI: [10.3390/app12199576](https://doi.org/10.3390/app12199576) EDN: [OXHZTI](https://www.edn.ru/entry/OXHZTI)
- Krylov A.A., Kovachev S.A., Radiuk E.A., Roginskiy K.A., Novikov M.A., Samylina O.S., Lobkovsky L.I., Semiletov I.P. MatNERApor – A Matlab Package for Numerical Modeling of Nonlinear Response of Porous Saturated Soil Deposits to P- and SH-Waves Propagation // Applied Sciences. 2022b. V. 12. 4614. DOI: [10.3390/app12094614](https://doi.org/10.3390/app12094614) EDN: [QMNRZG](https://www.edn.ru/entry/QMNRZG)
- Krylov A.A., Novikov M.A., Kovachev S.A., Roginskiy K.A., Ilinsky D.A., Ganzha O.Y., Ivanov V.N., Timashkevich G.K., Samylina O.S., Lobkovsky L.I., Semiletov I.P. Features of Seismological Observations in the Arctic Seas // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. V. 11. 2221. DOI: [10.3390/jmse11122221](https://doi.org/10.3390/jmse11122221) EDN: [QJKOML](https://www.edn.ru/entry/QJKOML)

FEATURES OF THE APPLICATION OF INSTRUMENTAL AND COMPUTATIONAL METHODS IN ASSESSING THE SEISMIC HAZARD OF MARINE REGIONS

Krylov A.A.^{1,2}

¹ Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow

² Sirius University of Science and Technology, «Sirius» Federal Territory

E-mail: artyomkrlyv@ocean.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРА ФРАКТАЛЬНОСТИ РЕЛЬЕФА В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ РУДОНОСНЫХ УЗЛОВ

Ливинский А.И., Горшков А.И.

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

E-mail: artem@mitp.ru

(устный доклад)

Фрактальная размерность достаточно широко применяется в науках о Земле для описания сложных, самоорганизующихся природных структур. Мандельброт [Мандельброт, 2002] показал, что многие структуры рельефа, например береговые линии, русла рек и др., обладают свойством самоподобия и характеризуются нецелочисленной фрактальной размерностью. Аналогичные закономерности установлены для геологических процессов на разных масштабах [Daya et al., 2017; Zhang, 2023]. В ряде исследований показана хорошая корреляция фрактальной размерности рельефа с зонами рудообразования [Горяинов и др., 2013; Hodkiewicz et al., 2005]. Это дает основания рассмотреть фрактальность рельефа в качестве одного из параметров в задаче определения характерных признаков мест локализации месторождений металлов с помощью методов распознавания образов. Фрактальность рельефа можно представить как шероховатость земной поверхности, где значение фрактальной размерности показывает степень изрезанности рельефа: чем выше значение, тем выше изрезанность.

Цель данной работы – выделение рудоносных структур на Кавказе и в Алтай-Саянском регионе с использованием параметра фрактальность рельефа методами распознавания образов. Объектами исследования являются узлы пересечения линеаментов, установленные методом морфоструктурного районирования.

Современные цифровые модели рельефа обладают достаточно высокой разрешающей способностью (с погрешностью по вертикали до 2 м при горизонтальном шаге порядка 30 м), что дает возможность вычисления значений параметра фрактальная размерность рельефа. Определение значений для каждого узла в изучаемых регионах выполнялось с использованием метода «подсчета коробок».

По данным SRTM [Farr et al., 2007] о высотах рельефа для каждого узла были определены матрицы со значениями высот в пределах площади узла. Метод определения фрактальной размерности базируется на основе определения Хаусдорфа – Безиковича:

$$D = \lim_{\delta} \frac{\log N(\delta)}{\log(\frac{1}{\delta})}$$

Каждый массив значений покрывается сеткой ячеек разного размера r , и подсчитывается количество ячеек N , которое требуется для полного покрытия массива. Значение фрактальной размерности определяется как угловой коэффициент графика линейной регрессии для облака точек, где по оси X отложены значения $\log(1/r)$, а по оси Y – $\log(N(r))$.

В работе приведены результаты расчетов фрактальной размерности для узлов Алтай-Саянского региона [Горшков и др., 2024] и Кавказа [Горшков и др., 2025]. В Алтай-Саянском регионе применение фрактальной размерности позволило уточнить перспективные области, согласующиеся с данными РОСГЕОЛФОНДА. На Кавказе при исследовании всего региона полностью вклад фрактальной размерности в результаты распознавания был несущественным. Поэтому территории Большого и Малого Кавказа были рассмотрены по отдельности, а узлы в пределах Рионской и Куринской впадин были исключены из анализа. В этом случае применение параметра фрактальность рельефа позволило уточнить классификацию узлов на рудоносные и нерудоносные.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания ИТПЗ РАН.

Литература

- Горшков А.И., Новикова О.В., Ливинский А.И. Использование методов распознавания образов для изучения особенностей пространственной локализации полиметаллического оруденения в Алтайско-Саянском регионе // Физика Земли. 2024. № 5. С. 57–68. DOI: [10.31857/S0002333724050049](https://doi.org/10.31857/S0002333724050049) EDN: [EJZTVN](https://www.edn.ru/EJZTVN)
- Горшков А.И., Ливинский А.И. Использование ГИС технологий и методов распознавания образов для определения рудоносных структур Кавказа по морфоструктурным данным // Геоинформатика. 2025. (в печати)
- Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю., Калашников А.О. Рельефообразование как элемент самоорганизации литосферы // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 9. С. 1366–1380. EDN: [RDDBQJ](https://www.edn.ru/RDDBQJ)
- Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 565 с. ISBN: 5-93972-108-7
- Daya A.A., Boomeri M., Mazraee N. Identification of geochemical anomalies by the use of concentration-area (C-A) fractal model in Nakhilab region, SE Iran // International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2017. V. 8. № 1. P. 70–81. DOI: [10.1504/IJMME.2017.10003267](https://doi.org/10.1504/IJMME.2017.10003267)
- Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., et al. The Shuttle Radar Topography Mission // Reviews of Geophysics. 2007. V. 45. № 2. RG2004. DOI: [10.1029/2005RG000183](https://doi.org/10.1029/2005RG000183) EDN: [XPMJQT](https://www.edn.ru/XPMJQT)
- Hodkiewicz P.F., Weinberg R.F., Gardoll S.J., Groves D.I. Complexity gradients in the Yilgarn Craton: Fundamental controls on crustal-scale fluid flow and the formation of world-class orogenic-gold deposits // Australian Journal of Earth Sciences. 2005. V. 52. № 6. P. 831–841. DOI: [10.1080/08120090500304257](https://doi.org/10.1080/08120090500304257)
- Zhang C. The fractal analysis of ore deposits guided a deep learning algorithm for recognizing geochemical anomalies related to mineralization // Japan Conference Union Meeting, Tokyo, Japan. May 2023.

USING THE FRACTAL PARAMETER OF RELIEF IN PROBLEMS OF RECOGNITION OF ORE-BEARING NODES

Livinskiy A.I., Gorshkov A.I.

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

E-mail: artem@mitp.ru

СТАТИСТИКА СЕЙСМОИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ РАЗНОГЛУБИННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Липеровская Е.В.¹, Родкин М.В.^{2,3}

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

³ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

E-mail: liper@ifz.ru

(устный доклад)

К настоящему времени накоплен довольно большой, разнообразный и частью противоречивый объем данных по сейсмоионосферным предвестникам. В большинстве случаев при этом указывается на красивые отдельные примеры наблюдаемых эффектов, которые, вообще говоря, могут быть и случайными. В работах [Lee et al., 2010; 2006; Родкин, Липеровская, 2023а] на основе качественных однородных и длительных рядов наблюдений была показана заведомая неслучайность ряда средних аномалий. Время проявления сейсмоионосферных эффектов обычно составляет несколько суток до землетрясений и несколько суток после. Заметим, что амплитуда таких средних аномалий оказалась на порядок и более слабой, чем в отдельных показательных случаях.

Ситуация, возможно, была бы более понятна, если бы существовала физическая интерпретация наблюдаемого. Но в недавней публикации [Пилипенко, Сурков, 2025] делается вывод, что согласованной интерпретации и физического понимания результатов наблюдений на данный момент также нет, хотя и был предложен ряд возможных физических механизмов для объяснения наблюдаемых эффектов.

Заметим, что ранее [Калинин и др., 1989], из физических соображений, были развиты модели разных физических механизмов для разноглубинных землетрясений. Затем такое различие было показано по сейсмическим данным [Rodkin, 2022]. На этом основании было показано и определенное различие средних сейсмоионосферных предвестников для разноглубинных землетрясений [Родкин, Липеровская, 2023б].

В работе предложена совокупная таблица, какие аномалии (например, в дневное или ночное время, на каких расстояниях по времени и пространству) для каких землетрясений выглядят одинаково, а какие различаются и как именно. Учет этих результатов позволяет более полно рассмотреть вопрос о характере аномалий и их физической интерпретации, так как дает дополнительную информацию.

Авторы не берутся сами полноценно интерпретировать выявленные закономерности, но надеются, что эти результаты помогут при решении задачи физической интерпретации сейсмоионосферных эффектов.

Исследование выполнено в рамках госзаданий ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН, ИМГиГ ДВО РАН.

Литература

- Калинин В.А., Родкин М.В., Томашевская И.С. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. М.: Наука, 1989. 158 с.
- Пилипенко В.А., Сурков В.В. Сейсмоэлектромагнитные и сейсмоионосферные явления: от пионерских работ Г.А. Соболева до наших дней // Физика Земли. 2025. № 4. С. 93–114. DOI: [10.31857/S0002333725040078](https://doi.org/10.31857/S0002333725040078) EDN: [XXMFWC](https://www.edn.ru/xxmfwc)
- Родкин М.В., Липеровская Е.В. О выделении систематической компоненты в изменчивости параметров динамических систем // Динамические процессы в геосферах. 2023а. Т. 15. № 2. С. 13–22. DOI: [10.26006/29490995_2023_15_2_13](https://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_2_13) EDN: [WKBQDX](https://www.edn.ru/wkbqdx)
- Родкин М.В., Липеровская Е.В. О различии физических механизмов разноглубинных землетрясений и характера их ионосферного отклика // Физика Земли. 2023б. № 3. С. 48–62. DOI: [10.31857/S0002333723030110](https://doi.org/10.31857/S0002333723030110) EDN: [KBCOKA](https://www.edn.ru/kbcoka)
- Le H., Liu J.Y., Liu L. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+ earthquakes during 2002–2010 // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 116. A02303. DOI: [10.1029/2010JA015781](https://doi.org/10.1029/2010JA015781)
- Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // Journal of Geophysical Research. 2006. V. 111. A05304. DOI: [10.1029/2005JA011333](https://doi.org/10.1029/2005JA011333) EDN: [YYNSTB](https://www.edn.ru/yynstb)
- 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. V. 179. P. 4197–4206. DOI: [10.1007/s00024-021-02927-4](https://doi.org/10.1007/s00024-021-02927-4) EDN: [XTWEBT](https://www.edn.ru/xtwebt)

STATISTICS OF SEISMOIONOSPHERIC EFFECTS IN THE F REGION OF THE IONOSPHERE FOR DIFFERENT-DEPTH EARTHQUAKES: ADDITIONAL DATA FOR INTERPRETATION

Liperovskaya E.V.¹, Rodkin M.V.^{2,3}

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

² Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

³ Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

E-mail: lipe@ifz.ru

3D МОДЕЛЬ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ И НЕОБОСНОВАННОСТЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТАГНАЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО УЧАСТКА ЛИТОСФЕРЫ У ПОДОШВЫ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ

Лобковский Л.И.¹, Баранов А.А.^{2,3}, Бобров А.М.²

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

³ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

E-mail: aabaranov@gmail.com

(устный доклад)

В последние годы в геофизической литературе широко распространилось понятие так называемых стагнирующих слэбов. Так, для зон субдукции северо-западного обрамления Тихого океана было построено более трех десятков региональных сейсмотомографических разрезов и выяснилось, что большая часть слэбов выполаживается в нижней части верхней мантии [Fukao et al., 2009]. Для таких слэбов в научной литературе появился устойчивый термин – стагнирующие слэбы (stagnant slab). Они были выявлены также и в Альпийско-Гималайско-Индонезийском поясе [Соколов, Трифонов, 2012]. Предполагается, что такие слэбы останавливаются в нижней части верхней мантии на длительный срок. Однако такая концепция противоречит фундаментальному закону сохранения массы. Если конвекция в малосжимаемой мантии продолжается, то как ее существенные элементы могут останавливаться и стагнировать? В настоящей работе с помощью программного кода Citcom численно решается уравнение Стокса с неньютоновской реологией для вязкости в мантии Земли. Рассчитываются мгновенные скорости течений в мантии Земли на основе глобальной модели сейсмической томографии SMEAN 2. Показано, что стагнирующие слэбы не неподвижны, а формируют верхнемантийные ячейки в различных районах Земли, в частности, меридиональные сечения через Алеутскую дугу в сечениях 0° в.д. (Гринвичский меридиан) и 20° в.д. дают возвратные ячейки с подъёмом вещества в Арктике. Это хорошо согласуется с различными геофизическими и геохимическими данными [Лобковский и др., 2013].

Широтные сечения в северном полушарии через Байкал (см. рис.) и южнее дают аналогичные возвратные ячейки, начинающиеся на тихоокеанской границе Евразийской плиты и простирающиеся на тысячи километров под ней, с подъёмом вещества в районе центральной Азии и Байкальской рифтовой зоны, что согласуется с кайнозойским внутриплитным вулканизмом в Центральной Азии [Ярмолюк и др., 2008]. Расчеты показывают, что стагнации в слэбах не происходит, а вещество в них продолжает двигаться. Данный результат важен для понимания геодинамических обстановок в Арктике и Центральной Азии, а также других регионов Земли.

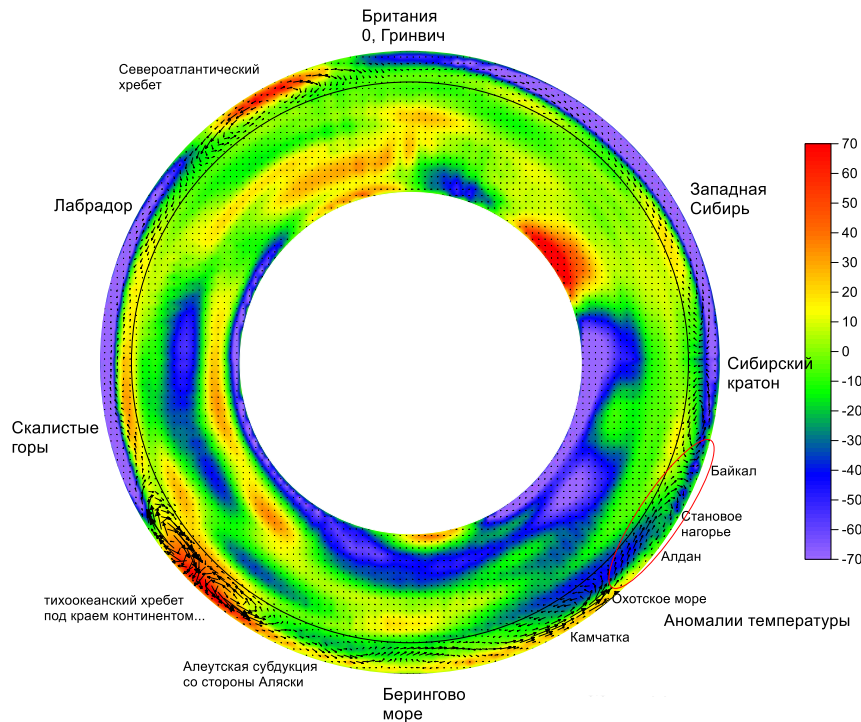


Рис. Широтное сечение Земли через Байкал (54° с.ш.). Векторное поле рассчитанных скоростей в мантии Земли показано черными стрелками. Черной окружностью показана граница между верхней и нижней мантией. Красным овалом показана область возвратной ячейки

Литература

- Лобковский Л.И., Шипилов Э.В., Кононов М.В. Геодинамическая модель верхнемантийной конвекции и преобразования литосферы Арктики в мезозое и кайнозое // Физика Земли. 2013. № 6. С. 20–38. DOI: [10.7868/S0002333713060100](https://doi.org/10.7868/S0002333713060100) EDN: [RDJTDX](https://www.edn.ru/rdjtdx)
- Соколов С.Ю., Трифонов В.Г. Роль астеносферы в перемещении и деформации литосферы (Эфиопско-Афарский суперплюм и Альпийско-Гималайский пояс) // Геотектоника. 2012. № 3. С. 3–17. EDN: [OXXIAL](https://www.edn.ru/oxxiat)
- Ярмолюк В.В., Кудряшова Е.А., Козловский А.М., Лебедев В.А. Позднекайнозойский вулканизм Хангая (Центральная Монголия) и проблемы новейшего горообразования в Центральной Азии // Доклады Академии наук. 2008. Т. 422. № 2. С. 223–228. EDN: [JKCWKB](https://www.edn.ru/jkcwkb)
- Fukao Y., Obayashi M., Nakakuki M. Deep Slab Project Group. Stagnant Slab: A Review // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2009. V. 37. P. 19–46. DOI: [10.1146/annurev.earth.36.031207.124224](https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124224) EDN: [KULIHL](https://www.edn.ru/kulihl)

3D MODEL OF MODERN GEODYNAMICS AND THE GROUNDLESSNESS OF THE IDEA OF STAGNANT SLAB AT THE BASE OF THE UPPER MANTLE

Lobkovsky L.I.¹, Baranov A.A.^{2,3}, Bobrov A.M.²

¹ Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow,

³ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

E-mail: aabaranov@gmail.com

СОВРЕМЕННАЯ ГЛОБАЛЬНАЯ ГЕОДИНАМИКА С ПОЗИЦИЙ 3D-МОДЕЛИ КОНВЕКЦИИ В МАНТИИ ЗЕМЛИ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ К РЕГИОНАЛЬНЫМ ТЕКТОНИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ

Лобковский Л.И.¹, Баранов А.А.^{2,3}, Бобров А.М.²

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

³ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

E-mail: aabaranov@gmail.com

(устный доклад)

В работе с помощью уравнения Стокса для безинерционного движения вязкой жидкости с неньютоновской реологией рассчитаны мгновенные скорости течений в сферической мантийной оболочке Земли на основе глобальной модели сейсмической томографии SMEAN 2. На поверхности сферической модели за счет мантийной конвекции с неньютоновской реологией, учитывающей ослабленные литосферные зоны спрединга и субдукции, получена самосогласованная модель геодинамики современной Земли [Лобковский и др., 2025a]. Модель автоматически учитывает все основные силы, действующие в мантии и на поверхности Земли. Построенная 3D модель мантийных течений хорошо описывает горизонтальные движения поверхности Земли, которые наблюдаются по данным космической геодезии, и дает количественную основу для интерпретации особенностей региональных геологических процессов [Лобковский и др., 2025b].

Как было показано ранее, постулат теории тектоники плит о твердотельном вращении плит на поверхности Земли (теорема Эйлера), на котором основаны кинематические построения тектоники плит, не всегда применим [Лобковский, 2016]. Другое исходное положение тектоники плит об их полной обособленности, или, другими словами, о замкнутости их границ, также не всегда выполняется. В частности, граница между Евразийской и Североамериканской плитами в северо-восточной Азии, по всей видимости, еще полностью не сформировалась в процессе длительной геодинамической эволюции Земли после распада Пангеи. Однако эта граница, согласно постулатам тектоники плит, обязательно должна была существовать. Поэтому многие авторы стремились «нарисовать» эту границу с помощью введения дополнительных малых плит (Амурской, Охотоморской и др.) вопреки имеющимся фактическим данным, например рассеянной сейсмичности и т.д. Анализ этих и других тектонических противоречий привел к обобщению классической тектоники плит, в котором вместо жестких плит допускались деформируемые плиты с возможностью незамкнутых границ [Лобковский, 2016]. При этом, однако, терялась возможность расчета кинематики плит с использованием теоремы Эйлера независимо от конвективных движений в мантии. Для количественного описания тектоники

деформируемых литосферных плит на сферической поверхности Земли требовалась трехмерная модель мантийной конвекции, что значительно усложняло расчеты движения литосферной оболочки по сравнению с эйлеровой кинематикой жестких плит. В недавних работах авторов [Лобковский и др., 2025а; 2025б] был сделан необходимый шаг к более адекватному описанию современной глобальной геодинамики по сравнению с тектоникой плит. Он основан на конвективной 3D модели современной глобальной геодинамики, которая, опираясь на реальные плотностные неоднородности Земли, полученные по данным сейсмической томографии, дает расчетную картину горизонтальных движений поверхности Земли, близко соответствующую кинематическим моделям тектоники плит и данным спутниковой геодезии. Это означает реальное обобщение тектоники литосферных плит для современного этапа развития Земли.

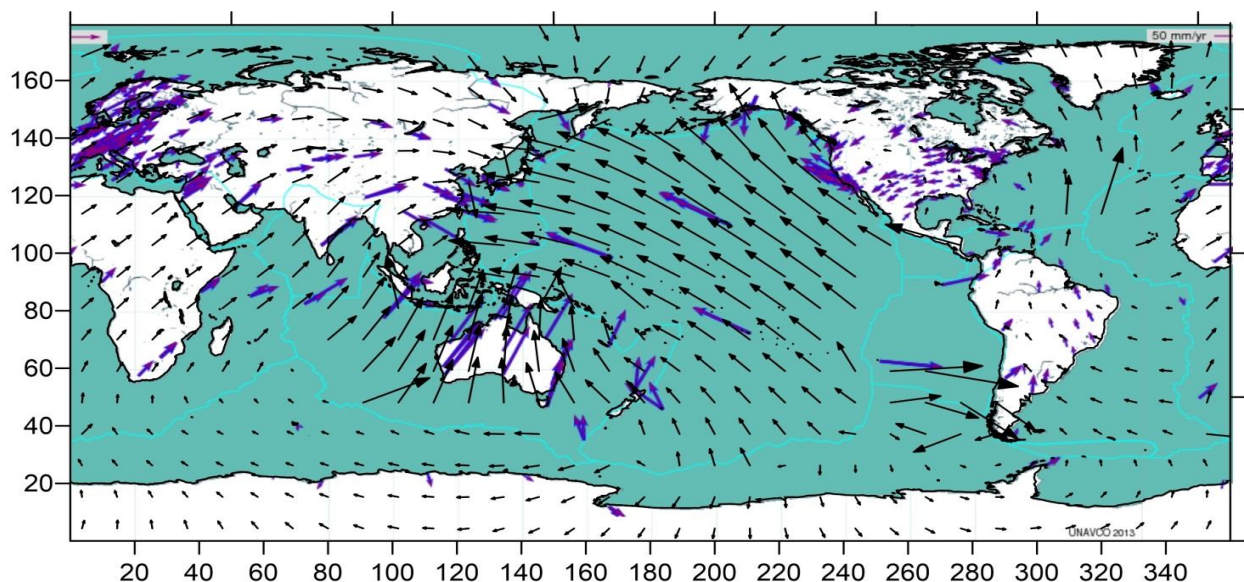


Рис. Векторное поле рассчитанных скоростей на поверхности Земли показано черными стрелками. Синими стрелками показаны скорости из модели ITRF [Altamimi et al., 2017]. Черной линией показаны контуры континентов. Голубой линией показаны границы основных плит

Литература

- Лобковский Л.И., Баранов А.А., Бобров А.М. Трехмерная модель конвекции в реально неоднородной мантии как основа количественного обобщения тектоники плит для современного этапа развития Земли // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2025а. № 523. С. 1–5.
- Лобковский Л.И., Баранов А.А., Бобров А.М., Чуваев А.В. Термоконвективная трехмерная сферическая модель современной геодинамики Земли: применение в исследовании тектоники и региональной геологии // Геотектоника. 2025б. № 1. С. 3–20. DOI: [10.31857/S0016853X25010012](https://doi.org/10.31857/S0016853X25010012) EDN: [DAKPEL](https://www.edn.ru/DAKPEL)
- Лобковский Л.И. Тектоника деформируемых литосферных плит и модель региональной геодинамики применительно к Арктике и Северо-Восточной Азии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 476–495. DOI: [10.15372/GiG20160302](https://doi.org/10.15372/GiG20160302) EDN: [VPERTX](https://www.edn.ru/VPERTX)

Altamimi Z., Métivier L., Rebischung P., Rouby H., Collilieux X. ITRF2014 plate motion model // Geophysical Journal International. 2017. V. 209. P. 1906–1912. DOI: [10.1093/gji/ggx136](https://doi.org/10.1093/gji/ggx136)
EDN: [CATBFT](#)

**MODERN GLOBAL GEODYNAMICS FROM THE 3D MODEL OF CONVECTION
IN THE EARTH'S MANTLE AS A GENERALIZATION OF THE THEORY
OF PLATE TECTONICS**

Lobkovsky L.I.¹, Baranov A.A.^{2,3}, Bobrov A.M.²

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow*

² *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow*

³ *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow*

E-mail: aabaranov@gmail.com

**К ВОПРОСУ ОБ АНОМАЛЬНО КОРОТКОМ ПРОМЕЖУТКЕ ВРЕМЕНИ
МЕЖДУ ОЧАГАМИ МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 30.07.2025 И 05.11.1952
В КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ЗОНЕ СУБДУКЦИИ**

Лобковский Л.И.^{1,2}, Гарагаш И.А.³, Шебалин П.Н.², Владимиров И.С.^{1,2}

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва*

² *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*

³ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

E-mail: llobkovsky@ocean.ru

(устный доклад)

Произошедшее 30.07.2025 сильнейшее землетрясение с магнитудой около 8.8 в Курило-Камчатской зоне субдукции относится к числу самых мощных мегаземлетрясений за всю историю наблюдений сейсмичности на Земле. Во многих отношениях это землетрясение было необычным, но самая большая его аномалия состояла в том, что очаг данного события, практически совпадающий с очагом более раннего мегаземлетрясения 05.11.1952 (с магнитудой около 9.0), оказался отделен от последнего рекордно коротким интервалом времени, составляющим всего 73 года. Заметим, что опубликованные в литературе оценки повторяемости мегаземлетрясений с магнитудами около 9 в одних и тех же местах составляют от первых сотен до тысячи лет в зависимости от расположения зон субдукции. Поэтому аномально короткий промежуток повторяемости в 73 года между рассматриваемыми Камчатскими мегасобытиями представляет собой серьезный вызов для геофизиков, требующий объяснения данного феномена.

Попытки объяснить отмеченный факт на основе вероятностной концепции сейсмических брешей [Федотов и др., 2012] не проясняют ситуацию. Даже формально промежуток времени 73 года не попадает в статистический интервал времени повторяемости сильнейших землетрясений 140 (± 60) лет, который дал С.А. Федотов для Курило-Камчатской дуги. Но основная трудность данного статистического подхода состоит в том, что он рассматривается в отрыве от анализа геодинамического процесса пододвигания Тихоокеанской плиты под Курило-Камчатскую островную дугу, который, по общепринятым представлениям, определяет возникновение в этой зоне сильнейших землетрясений.

Другое важное направление исследований сеймотектонических процессов в зонах субдукции и других сейсмоактивных областях основано на использовании современных спутниковых систем измерения смещений поверхности Земли с очень высокой точностью, которые путем решения обратной задачи можно связать с упругими смещениями среды в очаговой зоне разрыва пород перед землетрясением, во время землетрясения и после него на афтершоковой стадии процесса [Стеблов и др., 2018; Конвисар и др., 2025]. Данный количественный подход дает хорошие результаты, показывая вполне реалистическое

соответствие между наблюдаемыми по спутниковым данным смещениями на поверхности Земли и гипотетическими смещениями среды в очаге землетрясений. Однако короткий период спутниковых наблюдений (меньше 20 лет) не дает возможности сделать обоснованные заключения о прошлых этапах эволюции исследуемых очаговых зон на протяжении десятков и сотен лет до возникновения сильнейших землетрясений (например, считать процесс смещений в очаговых зонах квазистационарным).

В настоящей работе предлагается подход к анализу проблемы аномально короткого промежутка времени между очагами мегаземлетрясений 30.07.2025 и 05.11.1952 с позиций клавишно-блоковой модели взаимодействия пододвигаемой литосферной плиты с фронтальными участками островной дуги [Лобковский и др., 1980; Лобковский, Баранов, 1984; Lobkovsky et al., 1991]. Согласно этой модели, фронтальный клин островной дуги, под который пододвигается плита, разбит на блоки-клавиши поперечными к простиранию дуги разломами, что позволяет этим блокам деформироваться относительно независимо друг от друга в процессе накопления или разрядки в них напряжений, вызванных взаимодействием с движущейся плитой. С каждым из клавишных блоков связаны потенциальные очаги сильнейших землетрясений. Такая модель подводит тектоническую основу под концепцию сейсмических брекшей, давая принципиальное объяснение квази-независимому характеру сейсмических циклов в различных районах островной дуги. Наряду с разбиением фронтального клина поперечными разломами, он также разбивается продольными разломами на две или три части. Эти продольные разломы идут от подошвы клина до его поверхности под крутым углом к поверхности пододвигаемой плиты с наклоном от глубоководного желоба в сторону островной дуги. На поверхности фронтального клина указанные антитектические разломы морфологически проявляются в виде продольных хребтов, примером чего служит хребет Витязя на Курильском подводном склоне. Когда происходит сильнейшее землетрясение, то, как правило, вспарывается не только пологая поверхность контакта между подошвой клина и поверхностью пододвигаемой плиты, но и крутая поверхность продольного разлома. При этом пологая сейсмическая подвижка надвигового типа на контакте подошвы клина и поверхности плиты и крутая подвижка взбросового типа на продольном разломе клина дают практически одинаковую картину механизма землетрясения, получаемую по первым вступлениям сейсмических волн. Такая схожесть механизмов землетрясений от пологих надвиговых и крутых взбросовых подвижек привела к многолетней дискуссии между сторонниками и противниками тектоники плит в нашей стране. Так, например, в работах [Балакина, 1995; Балакина и др., 1996] отстаивалась точка зрения, что все сильнейшие землетрясения в островных дугах происходят

вследствие взбросовых подвижек по крутым продольным разломам подводных склонов без упоминания процесса субдукции.

С позиций клавишно-блоковой модели сильнейшие землетрясения, как отмечалось выше, сопровождаются реализацией обоих типов подвижек с различным их вкладом в разрядку накопленной энергии. При этом следует иметь в виду неоднородный характер строения островодужного склона, проявляющийся в том, что, наряду с областями с развитой системой крутых продольных разломов, встречаются области, в которых такие продольные разломы отсутствуют, и фронтальный клин в этих случаях сохраняет свою цельность. Такие неоднородности строения клина могут играть определяющую роль в скорости и величине накопления в нем упругой энергии, соответствующей сильнейшим землетрясениям, включая мегасобытия с предельными магнитудами около 9. Естественно предполагать, что в областях подводного склона с наличием крутых продольных разломов процесс непрерывного накопления упругой энергии в островодужном клине вследствие пододвигания плиты будет время от времени нарушаться частичным сбросом этой энергии в результате реализации сейсмических подвижек по этим разломам, сопровождаемым достаточно сильными землетрясениями с магнитудой около 7 и больше. Напротив, в не нарушенных разломами областях островодужного клина процесс накопления упругой энергии происходит практически без сбросов, поэтому здесь может быть достигнута очень большая величина упругой энергии за относительно короткий промежуток времени, что при разрядке может привести к мегаземлетрясению с магнитудой около 9. Именно такая сейсмотектоническая обстановка, по нашему мнению, характерна для южного участка Камчатского подводного склона и примыкающего к нему северного окончания Курильского островодужного склона, где произошли два мегаземлетрясения через очень короткий промежуток времени. В пользу данной точки зрения свидетельствует анализ строения и сейсмичности южной части Камчатского подводного склона, выполненный в работе [Авдейко, Палуева, 2010]. Описанные различные случаи накопления упругой энергии в островодужном клине для вариантов наличия или отсутствия в нем продольных разломов были подтверждены результатами численного моделирования разных сценариев деформирования клина с использованием программы FLAC.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0018).

Литература

Авдейко Г.П., Палуева А.А. Сегментация Камчатской зоны субдукции и оценка сейсмической активности сегментов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 1(15). С. 69–89. EDN: [MSVNJV](#)

- Балакина Л.М. Курило-Камчатская сейсмогенная зона – строение и порядок генерации землетрясений // Физика Земли. 1995. № 12. С. 48–57.
- Балакина Л.М., Захарова А.И., Москвина А.Г., Чепкунас Л.С. Закономерная связь механизмов очагов землетрясений с геологическим строением районов // Физика Земли. 1996. № 3. С. 33–52.
- Конвисар А.М., Тимошкина Е.П., Титков Н.Н., Михайлов В.О., Волкова М.С., Смирнов В.Б., Чебров Д.В. Модель Шипунского сейсмического разрыва Шипунского змлетрясения 17.02.2024 на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2025. № 1(65). С. 18–27. DOI: [10.31431/1816-5524-2025-1-65-18-27](https://doi.org/10.31431/1816-5524-2025-1-65-18-27) EDN: [KVLTMH](https://www.edn.ru/kvltmh)
- Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г., Шеменда А.Н. Моделирование деформаций островных дуг, приводящих к образованию тектонических террас и возникновению цунамигенных землетрясений // Доклады Академии наук СССР. 1980. Т. 255. № 1. С. 74–77.
- Лобковский Л.И., Баранов Б.В. Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // Доклады Академии наук СССР. 1984. Т. 275. № 4. С. 843–847.
- Стеблов Г.М., Лобковский Л.И., Владимирова И.С., Баранов Б.В., Сдельникова И.А., Габсатаров Ю.В. Сеймотектонические деформации Курильской островной дуги на разных стадиях сейсмического цикла, связанные с Симуширскими землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2018. № 6. С. 57–69. DOI: [10.1134/S0203030618060081](https://doi.org/10.1134/S0203030618060081) EDN: [YQJTV](https://www.edn.ru/yqjtzv)
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2011 – VIII 2016 гг.; вероятные место, время и развитие следующего сильнейшего землетрясения Камчатки с $M \geq 7.7$ // Вулканология и сейсмология. 2012. № 2. С. 3–26. EDN: [OWXGAT](https://www.edn.ru/owxgat)
- Lobkovsky L.I., Baranov B.V., Pristavakina E.I., Kerchman V. Analysis of seismotectonic processes in subduction zones from the standpoint of a keyboard model of great earthquakes // Tectonophysics. 1991. V. 199. № 2–4. P. 211–236. DOI: [10.1016/0040-1951\(91\)90173-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90173-P) EDN: [XOSJRR](https://www.edn.ru/xosjrr)

**ON THE QUESTION OF THE ABNORMALLY SHORT TIME INTERVAL BETWEEN
THE SOURCES OF THE MEGA-EARTHQUAKES OF 08/30/2025 AND 11/05/1952
IN THE KURIL-KAMCHATKA SUBDUCTION ZONE**

Lobkovsky L.I.^{1,2}, Garagash I.A.³, Shebalin P.N.², Vladimirova I.S.^{1,2}

¹ Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow

² Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

³ Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

E-mail: llobkovsky@ocean.ru

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА ВЫДЕЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТИХООКЕАНСКОМ ОГНЕННОМ КОЛЬЦЕ

Любушин А.А., Родионов Е.А.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

E-mail: lyubushin@yandex.ru

(устный доклад)

Произведена количественная оценка триггерного эффекта влияния солнечных вспышек на выделение энергии в результате сейсмических событий. Получена оценка в виде «процента» от интенсивности выделения сейсмической энергии триггерного эффекта воздействия солнечных вспышек на выделение сейсмической энергии в 8 областях Тихоокеанского огненного кольца (рис. 1).

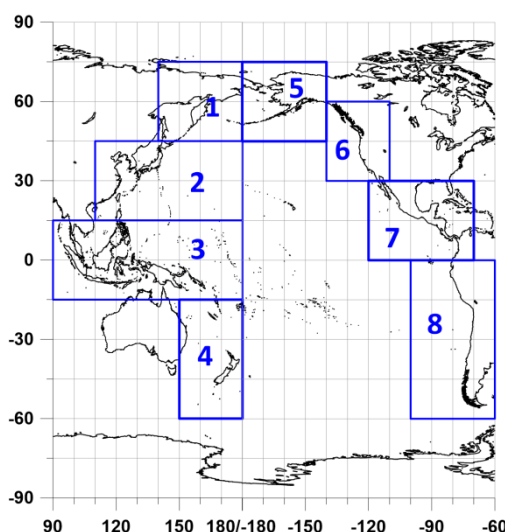


Рис. 1. Разбиение Тихоокеанского огненного кольца на 8 областей

Исходные данные по солнечным вспышкам свободно доступны с 31 июля 1996 года на сайте <https://www.spaceweatherlive.com/ru/arhiv/.html>. Вычислялись суммарные значения логарифмов интенсивностей солнечных вспышек в последовательных интервалах времени длиной 5 суток, и определялись временные точки правых концов 5-дневных интервалов, соответствующих локальным максимумам суммы логарифмов интенсивностей. Всего получилось 583 точки локальных максимумов. Для 8 регионов вычислялись величины сброшенных сейсмических энергий в результате сейсмических событий в последовательных интервалах времени длиной 1 сутки. В последовательности ежесуточных значений сброшенных сейсмических энергий находились 583 наибольших локальных максимумов, и вычислялись их логарифмы. Временные точки локальных максимумов интенсивности солнечных вспышек и сброшенных сейсмических энергий для 8-й области представлены на рис. 2.

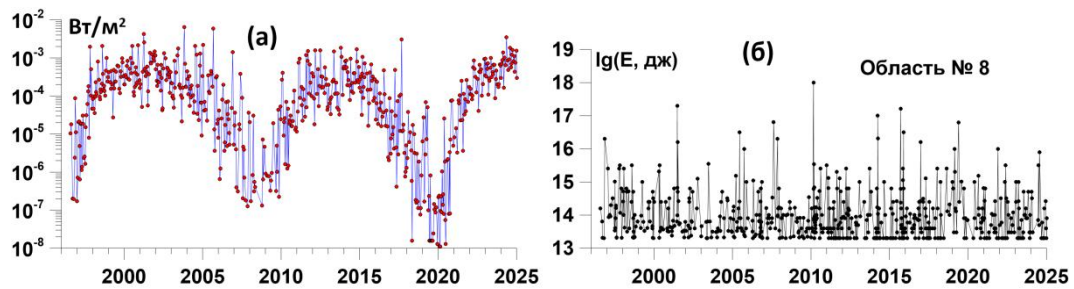


Рис. 2. (а) – красными точками представлена временная последовательность 583 локальных максимумов суммарных значений логарифмов интенсивностей солнечных вспышек в последовательных интервалах времени длиной 5 суток; (б) – черными точками представлена временная последовательность 583 наибольших локальных максимумов логарифмов ежесуточных сброшенных сейсмических энергий для 8-й области

С помощью модели интенсивностей точечных процессов оценивалась мера опережения моментами времени одного процесса относительно другого и обратная мера опережения в виде доли интенсивности, обусловленной влиянием противоположной временной последовательности, и вычислялась их разность [Lyubushin, Rodionov, 2025].

На рис. 3 представлен график разницы между компонентами матрицы влияния, иллюстрирующий динамику триггерного воздействия солнечных вспышек.



Рис. 3. Представлена усредненная по 8 регионам доля интенсивности выделения сейсмической энергии, обусловленная влиянием солнечных вспышек. Горизонтальная красная линия соответствует среднему значению

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Литература

Lyubushin A., Rodionov E. Quantitative Assessment of the Trigger Effect of Proton Flux on Seismicity // Entropy. 2025. V. 27. 505. DOI: [10.3390/e27050505](https://doi.org/10.3390/e27050505)

THE IMPACT OF SOLAR FLARES ON SEISMIC ENERGY RELEASE IN THE PACIFIC FIRE RING

Lyubushin A.A., Rodionov E.A.

Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

E-mail: lyubushin@yandex.ru

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ ЦУНАМИ ПРИ ВОЗМОЖНОМ ОБРУШЕНИИ ФРОНТАЛЬНОГО КРАЯ ЛЕДНИКА ТУЭЙТСА

Мазова Р.Х.^{1,2}, Артемьев А.Д.¹, Баранов А.А.³, Denisov E.F.¹, Van Den Bosch J.F.⁴

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

⁴ Catastrophes Faculty of Engineering, University of Antofagasta, Antofagasta, Chile

E-mail: raissamazova@yandex.ru

(устный доклад)

В работе проводится моделирование процесса обрушения фронтальной части ледника Туэйтса для оценки цунамиопасности побережий ближайших материков. В последние годы исследования, посвящённые динамике ледников и их взаимодействию с океаном, ведутся очень активно [Rignot et al., 2024; Mouginot et al., 2019]. Однако моделирование процесса генерации цунами в результате обрушения ледяных масс рассматривается лишь в ограниченном числе работ, фактически не исследующих возможность катастрофических последствий от обрушения фронтальной части ледника, генерации при данном процессе длинных поверхностных волн (цунами) и их возможное воздействие на ближайшие к Южному океану материковые побережья. Ключевым параметром обрушения ледника является масса отколовшегося фрагмента и величина вертикального смещения отколовшегося ледяного массива. В данной работе проводится оценка величины вертикального колебательного смещения отколовшихся фрагментов ледяной массы ледника Туэйтса, а также оценочный расчёт возможных сценариев обрушения с целью иллюстрации его потенциальных цунамигенных последствий. Для задания характерных геометрических параметров конструкции использовался продольный разрез ледника Туэйтса [Graham et al., 2022], на котором были выделены три зоны различной устойчивости в соответствии с длиной этих зон. Проведено численное моделирование генерации волн цунами при возможных обрушениях подводного края ледника Туэйтса, и исследовано их распространение в южной части Тихого океана. Получены волновые характеристики этого процесса, и оценены возможные высоты волн вдоль побережья Тихого океана (см. рис.). Показано, что даже при обрушении фронтального края ледника Туэйтса высоты волн на отдельных побережьях рассматриваемой акватории могут достигать 26 м.

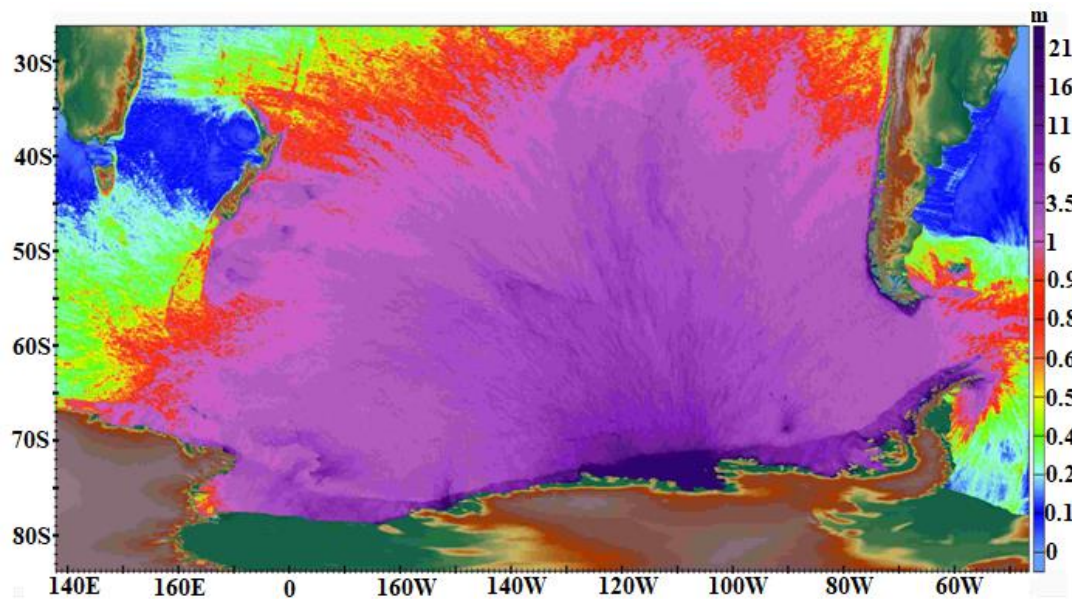


Рис. Распределение максимальных высот волн цунами по расчетной акватории

Литература

- Mouginot J., Rignot E., Scheuchl B. Continent-wide, interferometric SAR phase, mapping of Antarctic ice velocity // *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46. P. 9710–9718. DOI: [10.1029/2019GL083826](https://doi.org/10.1029/2019GL083826) EDN: [DHVEDU](https://www.edn.ru/entry/DHVEDU)
- Rignot E., Ciraci E., Scheuchl B., Tolpekin V., Wollersheim M., Dow C. Widespread seawater intrusions beneath the grounded ice of Thwaites Glacier, West Antarctica // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2024. V. 121. № 22. e2404766121. DOI: [10.1073/pnas.2404766121](https://doi.org/10.1073/pnas.2404766121) EDN: [XKFCNZ](https://www.edn.ru/entry/XKFCNZ)
- Graham A.G.C., Wählin A., Hogan K.A., et al. Rapid retreat of Thwaites Glacier in the pre-satellite era // *Nature Geoscience*. 2022. V. 15. P. 706–713. DOI: [10.1038/s41561-022-01019-9](https://doi.org/10.1038/s41561-022-01019-9) EDN: [IRHZEV](https://www.edn.ru/entry/IRHZEV)

CATASTROPHIC TSUNAMI WAVES FROM POSSIBLE FRONT EDGE COLLAPSE OF THE THWAITES GLACIER

Mazova R.Kh.^{1,2}, Artemyev A.D.¹, Baranov A.A.³, Denisov E.F.¹, Van Den Bosch J.F.⁴

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod

² Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow

³ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

⁴ Catastrophes Faculty of Engineering, University of Antofagasta, Antofagasta, Chile

E-mail: raissamazova@yandex.ru

КОЛЕБАНИЯ ПРИ НАСЫЩЕНИИ РОСТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТЕОРИИ ДИНАМО

Михайлов Е.А.^{1,2}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

E-mail: ea.mikhailov@physics.msu.ru

(устный доклад)

Генерация магнитных полей в большом количестве геофизических и астрофизических задач описывается в рамках теории динамо, описывающей переход кинетической энергии турбулентных движений в энергию магнитного поля. При относительно малых величинах данных полей задача описывается линейными дифференциальными уравнениями, что предполагает экспоненциальный рост решения. По мере роста поля все большую роль начинает играть исчерпание энергии турбулентных движений, что требует учета нелинейных членов. Подобный эффект хорошо известен и связан с насыщением роста по мере приближения поля к так называемому уровню равнораспределения [Arshakian et al., 2009]. Часто неявно предполагается, что поле монотонно выходит на стационарный режим и меняется достаточно мало.

В реальности в зависимости от свойств среды возможны различные сценарии. Это определяется собственными значениями оператора, описывающего возмущения поля около уровня насыщения [Mikhailov, 2017]. В том случае если они являются вещественными – то выход поля на стационарный режим будет действительно монотонным. В то же время, если спектр является комплексным – то магнитное поле будет совершать затухающие колебания около стационарных значений.

Интересно, что декременты затухания этих колебаний оказываются не очень велики, а периоды быть достаточно большими. Это позволяет предположить, что крупномасштабные магнитные поля могут существенно меняться со временем.

В работе на примере спиральных галактик с использованием модели динамо в тонком диске [Moss, 1995] проанализированы условия возникновения колебаний поля около уровня равнораспределения, их период, время затухания и амплитуда. Обсуждается возможность колебаний крупномасштабных магнитных полей на малых красных смещениях.

Литература

Arshakian T.G., Beck R., Krause M., Sokoloff D. Evolution of magnetic fields in galaxies and future observational tests with the Square Kilometre Array // *Astronomy and Astrophysics*. 2009. V. 494. P. 21–32. DOI: [10.1051/0004-6361/200810964](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810964) EDN: [LOWAV](https://www.edn.ru/LOWAV)

- Mikhailov E.* Galactic magnetic field reversals and vorticity of transition layers // *Magnetohydrodynamics*. 2017. V. 53. P. 357–363. DOI: [10.22364/mhd.53.2.15](https://doi.org/10.22364/mhd.53.2.15) EDN: [XOIIIXW](https://www.edn.ru/XOIIIXW)
- Moss D.* On the generation of bisymmetric magnetic field structures in spiral galaxies by tidal interactions // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1995. V. 275. P. 191–194. DOI: [10.1093/mnras/275.1.191](https://doi.org/10.1093/mnras/275.1.191)

PERIOD AND AMPLITUDE OF GALACTIC MAGNETIC FIELDS OSCILLATIONS

Mikhailov E.A.^{1,2}

¹ *Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow*

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow*

E-mail: ea.mikhajlov@physics.msu.ru

СЕЙСМИЧНОСТЬ ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ ЗА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ ПЕРИОД НАБЛЮДЕНИЙ

Морозов А.Н.^{1,2,3}, Ваганова Н.В.³, Асминг В.Э.⁴, Фёдоров И.С.⁴

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

² Геофизический центр РАН, г. Москва

³ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН, г. Архангельск

⁴ Кольский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Апатиты

E-mail: morozovalexey@yandex.ru

(устный доклад)

В работе рассмотрены пространственно-временные особенности проявления сейсмичности восточного сектора Российской Арктики за весь инструментальный период наблюдений (1909–2022 гг.). Для этого был создан сводный уточнённый и унифицированный каталог землетрясений восточного сектора Российской Арктики за период с 1909 по 1961 г. При его создании использовался наиболее полный набор инструментальных данных, современная глобальная скоростная модель ak135 [Kennett et al., 1995] и усовершенствованный алгоритм локации, реализованный в программе NAS (New Association System) [Fedorov et al., 2019]. Объединение данных с каталогом землетрясений Арктической зоны Российской Федерации за период 1962–2022 гг. [Gvishiani et al., 2022; Vorobieva et al., 2023] позволило сформировать сводный каталог землетрясений восточного сектора Российской Арктики за период с 1909 по 2022 г.

Большинство эпицентров землетрясений сосредоточено в районе срединно-океанического хребта Гаккеля и его продолжения на шельфе моря Лаптевых, а также в континентальной части Северо-Восточной Якутии. В районе шельфа моря Лаптевых присутствуют линейные и рассеянные зоны сейсмичности, соответствующие современным геодинамическим структурам. Распределение эпицентров как по времени, так и магнитуде также отражает основные этапы в развитии инструментальных сейсмических наблюдений в стране.

На основе созданного сводного каталога землетрясений восточного сектора Российской Арктики за период 1909–2022 гг. проведено сравнение ЛДФ-моделей карт ОСР-97, ОСР-2016 [Уломов, Шумилина, 1999; Уломов и др., 2016] с инструментальными данными. Границы и значения $M_{\max}$ рассмотренных ЛДФ-моделей в разной степени соответствуют реальному распределению землетрясений и их магнитудам:

– ЛДФ-модель ОСР-97 в целом корректно отражает геометрию сейсмоактивных зон, но имеет завышенные значения $M_{\max}$ для большинства доменов и линеаментов;

– ЛДФ-модель ОСР-2016 демонстрирует наибольшее соответствие как по пространственному положению доменов и линеаментов, так и по значениям магнитуд $M_{\max}$, однако требует точечной корректировки параметров некоторых элементов.

Полученные результаты могут служить основой в будущих исследованиях, связанных с оценкой потенциальных природно-техногенных рисков и сейсмической опасности арктических и прилегающих к ним территорий. Они также могут быть применены для решения задач обеспечения безопасной эксплуатации промышленных систем и объектов при освоении крупных месторождений в восточном секторе Российской Арктики.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-77-30010-П «Системный анализ динамики геофизических процессов в Российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта».

Литература

- Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г., Гусев А.А., Гусев Г.С., Акатова К.Н., Антикаев Ф.Ф., Данилова Т.И., Кожурин А.И., Медведева Н.С., Никонов А.А., Перетокин С.А., Пустовитенко Б.Г., Стром А.Л. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–122. EDN: [WJDTLZ](#)
- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ, 1999. 57 с.
- Fedorov A.V., Asming V.E., Jevtjugina Z.A., Prokudina A.V. Automated seismic monitoring system for the European Arctic // Seismic Instruments. 2019. V. 55. № 1. P. 17–23. DOI: [10.3103/S0747923919010067](#)
- Gvishiani A.D., Vorobieva I.A., Shebalin P.N., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Skorkina A.A. Integrated Earthquake Catalog of the Eastern Sector of the Russian Arctic // Applied Sciences. 2022. V. 12. № 10. P. 5010. DOI: [10.3390/app12105010](#) EDN: [UUYOCP](#)
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes // Geophysical Journal International. 1995. V. 122. № 1. P. 108–124. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x](#)
- Vorobieva I.A., Gvishiani A.D., Shebalin P.N., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Skorkina A.A., Sergeeva N.A., Fomenko N.A. Integrated Earthquake Catalog II: The Western Sector of the Russian Arctic // Applied Sciences. 2023. V. 13. № 12. P. 7084. DOI: [10.3390/app13127084](#) EDN: [UFUMJT](#)

SEISMICITY OF THE EASTERN SECTOR OF THE RUSSIAN ARCTIC DURING THE INSTRUMENTAL OBSERVATION PERIOD

Morozov A.N.^{1,2,3}, Vaganova N.V.³, Asming V.E.⁴, Fedorov I.S.⁴

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

² Geophysical Center, RAS, Moscow

³ Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center for Comprehensive Study of the Arctic named after Academician N.P. Lavrov, UB RAS, Arkhangelsk

⁴ Kola branch, Geophysical Survey, RAS, Apatity

E-mail: morozovalexey@yandex.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ АФТЕРШОКОВ ИНДУЦИРОВАННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ХИБИНСКОГО МАССИВА

Моторин А.Ю., Баранов С.В.

Кольский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Апатиты

E-mail: motorinayu@krsc.ru

(устный доклад)

Данные сейсмического мониторинга природно-техногенной сейсмичности на удароопасных месторождениях Хибинского массива Кировского филиала АО «Апатит» [Абрашитов и др., 2023] позволили выявить подобие закономерностей постсейсмической активности природно-техногенных и тектонических землетрясений [Motorin, Baranov, 2022; Баранов и др., 2021; 2020; Моторин, Баранов, 2024]. Таким образом, подходы для оценки постсейсмической опасности, успешно применяемые для тектонических землетрясений [Баранов, 2019; Баранов и др., 2023], были адаптированы для использования в информационной системе «Aftershock», разработанной для Кировского филиала АО «Апатит».

Система «Aftershock» в режиме реального времени получает данные о сейсмичности из базы данных КФ АО «Апатит». Прогноз постсейсмической опасности выполняется для сейсмических событий с $E \geq 10^7$ Дж ($K \geq 7$). Реализованы два варианта прогноза: по данным об основном толчке, доступный сразу, и с привлечением информации о первых афтершоках, а также три различные стратегии прогноза: мягкая стратегия, минимизирующая затраты на поддержание тревоги, жесткая, минимизирующая пропуск целевых событий, и нейтральная – для остальных случаев.

Оценки пространственной области по основному толчку используют его энергию для расчета области афтершоков [Моторин, Баранов, 2024]. Область тревоги представляет собой цилиндр с центром в гипоцентре основного толчка. Если доступна информация о первых афтершоках, эпицентральная область заменяется на «стадион», ориентированный по облаку первых афтершоков. Размер области определяется по трем прогнозным стратегиям.

Прогноз энергетического класса сильнейшего афтершока возможен как по основному толчку с использованием динамического закона Бота, так и по данным о первых афтершоках [Motorin, Baranov, 2022; Баранов и др., 2019]. Для каждой из этих оценок рассчитываются три варианта прогноза класса KI , которые соответствуют трем стратегиям.

Прогноз длительности опасного периода возможен как на основе усреднённой длительности всех предыдущих серий, так и с учетом фактического распределения афтершоков за первые часы аналогично подходу, использованному в работе [Шебалин, Баранов, 2019].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00604-25) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке.

Литература

- Абрашитов А.Ю., Онуприенко В.С., Корчак П.А. Трехуровневая система сейсмического мониторинга массива горных пород Хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд // Горная промышленность. 2023. № S1. С. 36–42. DOI: [10.30686/1609-9192-2023-S1-36-42](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-36-42) EDN: [PPFULJ](https://www.edn.ru/PPFULJ)
- Баранов С.В. Теоретические основы оценки опасности сильных афтершоков землетрясений: доктор наук. ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 2019. URL: <https://dissercat.com/content/teoreticheskie-osnovy-otsenki-opasnosti-silnykh-aftershokov-zemletryaseni> (дата обращения: 25.09.2025).
- 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) EDN: [NKPGYE](https://www.edn.ru/NKPGYE)
- Баранов С.В., Моторин А.Ю., Шебалин П.Н. Пространственное распределение повторных толчков в условиях техногенной сейсмичности // Физика Земли. 2021. № 4. DOI: [10.31857/S0002333721040025](https://doi.org/10.31857/S0002333721040025) EDN: [MKAAUI](https://www.edn.ru/MKAAUI)
- Баранов С.В., Павленко В.А., Шебалин П.Н. О прогнозировании афтершоковой активности. 4. Оценка максимальной магнитуды последующих афтершоков // Физика Земли. 2019. № 4. С. 15–32. DOI: [10.31857/S0002-33372019415-32](https://doi.org/10.31857/S0002-33372019415-32) EDN: [YINBRK](https://www.edn.ru/YINBRK)
- Баранов С.В., Шебалин П.Н., Воробьева И.А., Селюцкая О.В. Автоматизированная оценка опасности афтершоков землетрясения в Турции 06.02.2023 г., $M_w=7.8^*$ // Физика земли. 2023. № 6. С. 133–141. DOI: [10.31857/S0002333723060042](https://doi.org/10.31857/S0002333723060042) EDN: [MUXRXQ](https://www.edn.ru/MUXRXQ)
- Моторин А.Ю., Баранов С.В. Оценка области повторных толчков по первым афтершокам на месторождениях Хибин // Физика Земли. 2024. № 6. С. 164–177. DOI: [10.31857/S0002333724060n5](https://doi.org/10.31857/S0002333724060n5) EDN: [RFWQTL](https://www.edn.ru/RFWQTL)
- Шебалин П.Н., Баранов С.В. О прогнозировании афтершоковой активности. 5. Оценка длительности опасного периода // Физика Земли. 2019. № 5. С. 22–37. DOI: [10.31857/S0002-33372019522-37](https://doi.org/10.31857/S0002-33372019522-37) EDN: [ALYMHX](https://www.edn.ru/ALYMHX)
- Motorin A., Baranov S. Distribution of Strongest Aftershock Magnitudes in Mining-Induced Seismicity // Frontiers in Earth Science. 2022. V. 10. 902812. DOI: [10.3389/feart.2022.902812](https://doi.org/10.3389/feart.2022.902812) EDN: [KGBFXP](https://www.edn.ru/KGBFXP)

AUTOMATED HAZARD ASSESSMENT OF AFTERSHOCKS OF INDUCED SEISMICITY IN THE Khibiny MASSIF

Motorin A.Yu., Baranov S.V.

Kola branch, Geophysical Survey, RAS, Apatity

E-mail: motorinayu@krsc.ru

СВЯЗЬ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ И ВАРИАЦИИ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Назарова Л.А., Назаров Л.А.

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: mining1957@mail.ru

(устный доклад)

Введение. Одна из основных задач современной сейсмологии – систематическое определение фокальных параметров землетрясений, формирование и пополнение их каталогов, позволяющих выявлять пространственно-временные закономерности сейсмического процесса статистическими методами, как правило, без привлечения количественной информации об изменениях полей напряжений. Последнее обусловлено трудностью построения детальных геомеханических моделей крупномасштабных геологических объектов, поскольку данные об их структуре и свойствах имеют высокую степень неопределенности. Это, по-видимому, одна из основных причин отсутствия надежной методики прогноза землетрясений [Ammon et al., 2020].

Ситуация с геотехническими объектами более оптимистична. Рудники и шахты имеют системы микросейсмического мониторинга и базы данных о динамических событиях, что в совокупности с известной структурой, свойствами пород и данными измерений напряжений позволяет создать геомеханическую модель, адекватно описывающую эволюцию поля напряжений на разрабатываемом месторождении и пригодную для форвардного расчета полей напряжений в соответствии с графиком горных работ и прогноза динамических событий.

Здесь предложен подход, позволяющий выявить пространственно-временные связи между информативными характеристиками случайных и детерминированных процессов различной физической природы, который апробирован на геомеханических объектах различного масштабного уровня (породный образец, рудник). Подход заключается в установлении статистически значимых корреляционных зависимостей между регулярными составляющими динамических рядов, записанными в разных участках объекта исследования.

Образец. Мраморные диски (диаметр 50 мм) подвергались диаметральному квазистатическому сжатию (рис. 1а, б), методом спекл-фотографии (WLSP) регистрировались микротрещины на различных участках (B_1, B_2, B_3) поверхности (рис. 1в, г). На рис. 1д показана зависимость числа микротрещин N_k (k – номер области B_k) от параметра нагружения m . Для каждого m рассчитаны коэффициенты корреляции $\xi_{ij}(m)$ между $N_i(n)$ и $N_j(n)$ ($n \leq m$) (рис. 1д). Оказалось, что уже при уровне нагрузки, составляющей 50% от

разрушающей, имеет место практически функциональная зависимость ($\xi_{ij} > 0.8$) между поврежденностью в различных зонах образца. Это создает принципиальную возможность контролировать состояние всего объекта, осуществляя мониторинг нарушенности только (доступной) части.

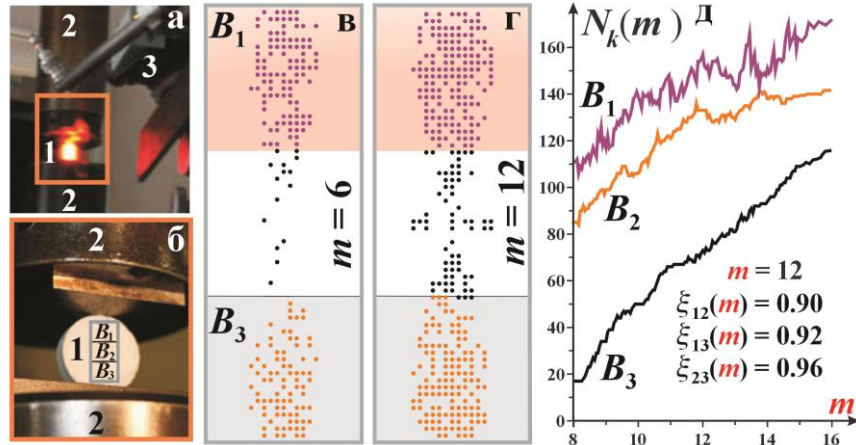


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки: 1 – образец, 2 – пресс, 3 – WLSP (а, б); распределение микротрещин при различном уровне нагружения m (в, г); зависимости N_k от m в различных зонах образца B_k и коэффициент корреляции при $m = 12$ (д)

Рудник Таштагол. Создана и численно реализована геомеханическая модель объекта (рис. 2а) с учетом изменения конфигурации выработанного пространства при развитии горных работ в 1989–2020 гг., и найдена средняя интенсивность напряжений $T(B_k, t)$ в каждом блоке B_k (рис. 2б). По данным сейсмостанции рудника (координаты гипоцентра, время и энергия E динамического события) подсчитано число $N(B_k, t)$ событий ($E \leq 10$ кДж), и вычислены коэффициенты корреляции $\xi_{k,l}(t)$ между $N(B_k, t)$ и $T(B_l, t)$ для всех пар блоков. Оказалось, что если $|\xi_{k,l}(t)| \geq 0.75$, то полученные регрессионные зависимости позволяют с хорошей точностью спрогнозировать уровень умеренной сейсмичности $N(B_k, t)$ в блоке B_k по среднему напряжению $T(B_l, t)$ в блоке B_l , найденному форвардным расчетом поля напряжений в соответствии с перспективным планом отработки месторождения (рис. 2в).

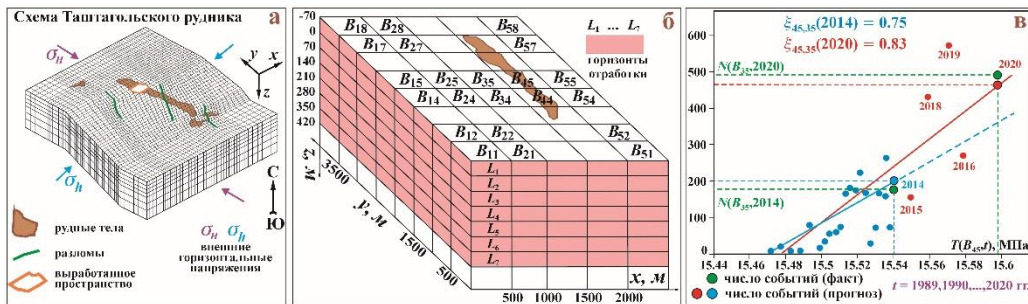


Рис. 2. Модель объекта (а); нумерация блоков (б); регрессионные зависимости «число событий – напряжение», сравнение фактических и прогнозных данных (в)

Работа выполнена в рамках проекта НИР (гос. регистрация № 124020700085-5).

Литература

Ammon C.J., Velasco A.A., Lay T., Wallace T.C. Foundations of Modern Global Seismology. Elsevier, 2020. 538 p. DOI: [10.1016/B978-0-12-815679-7.00002-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815679-7.00002-1) EDN: [YFSFRN](https://www.edn.net/YFSFRN)

RELATIONSHIP OF INDUCED SEISMICITY AND STRESS FIELD VARIATION BY LABORATORY EXPERIMENTS AND FIELD OBSERVATIONS DATA

Nazarova L.A., Nazarov L.A.

Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch, RAS, Novosibirsk

E-mail: mining1957@mail.ru

СИНЕРГИЯ НЕЗАВИСИМЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Некрасова А.К.¹, Горшков А.И.¹, Кособоков В.Г.^{1,2}

¹ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*

² *Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Rome, Italy*

E-mail: nastia@mitp.ru

(устный доклад)

Представлена инновационная синергия двух независимых методов, каждый из которых широко применяется в рамках нео-детерминистского подхода к оценке сейсмической опасности. А именно, в сейсмически активном регионе предложено совместное использование Распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений (Pattern Recognition of Earthquake Prone Areas, PREPA) и Общего закона подобия для землетрясений (Unified Scaling Law for Earthquakes, USLE).

Подход PREPA классифицирует морфоструктурные узлы как «опасные» (Dangerous, D) или «неопасные» (Not dangerous, N), основываясь только на геологических, геоморфологических и геофизических признаках, при этом сейсмическая история региона не учитывается. Напротив, методика USLE оперирует исключительно с каталогами землетрясений, характеризуя сейсмический поток значениями коэффициентов A , B и C , отражающими интенсивность сейсмичности, отношение частоты слабых и сильных землетрясений и фрактальную размерность эпицентров соответственно, а также контрольным параметром η , определяющим время между землетрясениями.

Пилотное исследование выполнено для территорий Большого Кавказа, Алтай-Саян и Прибайкалья, где были использованы полученные ранее результаты PREPA [Gorshkov *et al.*, 2003; Горшков *и др.*, 2018] и USLE [Kossobokov, Nekrasova, 2018a; 2018b; Nekrasova, Kossobokov, 2023], а также не публиковавшиеся ранее результаты обоих методов для Командорских островов. Для выявления различий между распределениями параметров USLE в 30-километровых окрестностях узлов классов D и N использовался двухвыборочный критерий Колмогорова – Смирнова.

Результаты сравнения распределений коэффициентов A , B и C в узлах классов D и N демонстрируют статистически значимые регионально специфические различия (см. рис.). В частности, для Большого Кавказа выявлено значимое различие в распределении параметра B . На территории Алтай-Саян наблюдается более высокая сейсмическая активность (параметр A) и кластеризация событий (параметр C) в узлах класса D. В Прибайкалье, напротив, узлы D характеризуются меньшей активностью по сравнению с N, что может быть связано с особенностями тектонической структуры региона. На

Командорских островах различия проявляются преимущественно в параметре C , указывая на различную степень фрагментации разломов и блоков в узлах классов D и N.

Полученные результаты пилотного исследования выявляют универсальность предложенного подхода, ориентированного на региональную специфику сейсмического режима. Синергия PREPA – USLE может служить основой для систематического мониторинга параметров сейсмичности на всей территории Российской Федерации и открывает перспективы для дальнейшего анализа пространственно-временной изменчивости контрольных параметров сейсмического режима. Сочетание подходов может способствовать более глубокому пониманию процесса возникновения землетрясений в рамках сложной нелинейной иерархически самоорганизованной системы разломов и блоков литосферы Земли.

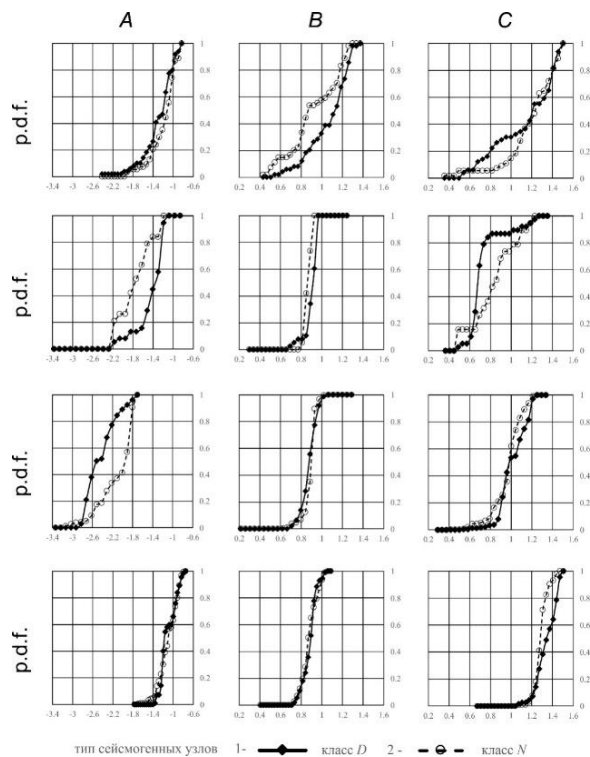


Рис. Эмпирические функции распределения вероятностей (p.d.f.) коэффициентов A , B и C (слева направо) USLE, оцененных в окрестностях узлов D и N в регионах Большой Кавказ, Алтай-Саяны, Прибайкалье и Командорские острова (сверху вниз)

Литература

- Горшков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье // Доклады Академии наук. 2018. Т. 479. № 3. С. 333–335. DOI: [10.7868/S0869565218090219](https://doi.org/10.7868/S0869565218090219) EDN: [YTFTPUF](https://www.edn.ru/ytftpuf)
- Gorshkov A., Kossobokov V., Soloviev A. Recognition of earthquake prone areas // Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction / Keilis-Borok V.I., Soloviev A.A. (Eds.). Heidelberg: Springer, 2003. P. 239–310. DOI: [10.1007/978-3-662-05298-3_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-05298-3_6)

- Kossobokov V.G., Nekrasova A.* Earthquake Hazard and Risk Assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: Altai-Sayan Region // *Natural Hazards*. 2018a. V. 93. P. 1435–1449. DOI: [10.1007/s11069-018-3359-z](https://doi.org/10.1007/s11069-018-3359-z) EDN: [WYAEHK](#)
- Kossobokov V.G., Nekrasova A.* Earthquake Hazard and Risk Assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: Greater Caucasus and Crimea // *Journal of Seismology*. 2018b. V. 22. P. 1157–1169. DOI: [10.1007/s10950-018-9759-4](https://doi.org/10.1007/s10950-018-9759-4) EDN: [AHFOSS](#)
- 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*. 2023. V. 116. P. 2. DOI: [10.1007/s11069-022-05750-9](https://doi.org/10.1007/s11069-022-05750-9) EDN: [EEAJVI](#)

SYNERGY OF INDEPENDENT METHODS FOR MONITORING SEISMIC REGIME

Nekrasova A.K.¹, Gorshkov A.I.¹, Kossobokov V.G.^{1,2}

¹ *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow*

² *Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Roma, Italy*

E-mail: nastia@mitp.ru

ОТКЛИК СЕЙСМИЧНОСТИ В ОЧАГОВОЙ ЗОНЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ($M \geq 7$) СЕВЕРНОЙ КАЛИФОРНИИ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАК ВОЗМОЖНЫЙ ИНДИКАТОР НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Новиков В.А.¹, Лазарева Е.А.²

¹ Объединённый институт высоких температур РАН, г. Москва

² Научная станция РАН, г. Бишкек

E-mail: novikov@ihed.ras.ru

(устный доклад)

Ранее был показан статистически значимый рост сейсмической активности Земли после сильных солнечных вспышек класса X, особенно в зоне с радиусом 5000 км вокруг подсолнечной точки [Новиков, Сорокин, 2024; Sorokin, Novikov, 2024]. Предполагается, что землетрясения могут инициироваться всплеском теллурических токов в разломах земной коры, индуцируемым сильными вариациями геомагнитного поля (ГМП), как следствие воздействия рентгеновского излучения солнечной вспышки на ионосферу [Sorokin et al., 2023] по аналогии с инициированием землетрясений импульсами электрического тока, подаваемыми в земную кору от искусственного источника [Зейгарник и др., 2022]. Было показано, что электромагнитное воздействие проявляется наиболее эффективно в афтершоковых зонах сильных землетрясений, где оно приводит как к росту количества афтершоков, так и возникновению сильных афтершоков с $M \geq 6$ с задержкой 6–8 суток после воздействия [Новиков, Сорокин, 2024]. Такая задержка может быть обусловлена миграцией проводящих флюидов в разломные зоны, снижающей их прочность, под воздействием вариаций ГМП, что подтверждается результатами анализа отклика сейсмичности флюидонасыщенных геотермальных полей Северной Калифорнии на сильные вариации ГМП $|dB_x/dt| \geq 50$ нТл/мин [Novikov, Lazareva, 2025].

В продолжение данной работы проведен статистический анализ отклика сейсмической активности очаговой зоны землетрясения Cape Mendocino (Калифорния, США, 05.12.2024, $M = 7.0$) на динамические воздействия 8 удаленных сильных землетрясений ($M \geq 7.0$) Северной Калифорнии (1980–2019 гг.). Показано, что в очаговой зоне, размер которой определялся в соответствии с работой [Завьялов, Зотов, 2021], наблюдается статистически значимый прирост суточного числа землетрясений в течение 15 суток после динамического воздействия за 5–20 лет до основного толчка, который возрастает по мере приближения к нему. Анализ воздействия 24 сильных вариаций ГМП $|dB_x/dt| \geq 50$ нТл/мин (1991–2024 гг.) на очаговые зоны всех анализируемых сильных землетрясений с $M \geq 7$ также показывает статистически значимый всплеск сейсмической активности на 2–10 сутки после сильных вариаций ГМП.

Таким образом, отклик сейсмичности на внешние динамические и электромагнитные триггерные воздействия может рассматриваться как индикатор напряженно-деформированного состояния земной коры и указывать на место возникновения сильного землетрясения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00205.

Литература

- 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) EDN: [YJNHDK](https://www.edn.ru/yjnhdk)
- 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) EDN: [VUPKUV](https://www.edn.ru/vupkuv)
- Новиков В.А., Сорокин В.М. Электромагнитные триггерные эффекты в системе «ионосфера–атмосфера–литосфера» и их возможное использование для краткосрочного прогноза землетрясений // Физика Земли. 2024. № 5. С. 97–112. DOI: [10.31857/S0002333724050078](https://doi.org/10.31857/S0002333724050078) EDN: [EJWLDI](https://www.edn.ru/ejwldi)
- Novikov V.A., Lazareva E.A. Response of Seismicity of Northern California Geothermal Fields to Sharp Variations of the Geomagnetic Field // Doklady Earth Sciences. 2025. V. 524. 15. DOI: [10.1134/S10283334X25607308](https://doi.org/10.1134/S10283334X25607308) EDN: [QBWUGV](https://www.edn.ru/qbwugv)
- Sorokin V.M., Novikov V.A. Possible Interrelations of Space Weather and Seismic Activity: An Implication for Earthquake Forecast // Geosciences. 2024. V. 14. 116. DOI: [10.3390/geosciences14050116](https://doi.org/10.3390/geosciences14050116) EDN: [PFPTGR](https://www.edn.ru/pfptgr)
- Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Mushkarev G.Yu., Novikov V.A. Telluric Currents Generated by Solar Flare Radiation: Physical Model and Numerical Estimations // Atmosphere. 2023. V. 14. 458. DOI: [10.3390/atmos14030458](https://doi.org/10.3390/atmos14030458) EDN: [VOLBUK](https://www.edn.ru/volbuk)

SEISMICITY RESPONSE IN THE SOURCE ZONES OF STRONG EARTHQUAKES ($M \geq 7$) OF NORTHERN CALIFORNIA TO DYNAMIC AND ELECTROMAGNETIC IMPACTS AS A POSSIBLE INDICATOR OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE EARTH CRUST

Novikov V.A.¹, Lazareva E.A.²

¹ Joint Institute for High Temperatures, RAS, Moscow

² Research Station, RAS, Bishkek

E-mail: novikov@ihed.ras.ru

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ОЛЕНЕКСКОЙ ПРОТОКИ (ДЕЛЬТА Р. ЛЕНЫ)

Новиков М.А., Крылов А.А.

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

E-mail: mihail.novikow@mail.ru

(устный доклад)

Дельта реки Лены является сейсмически активной зоной, находящейся на стыке структур Сибирской платформы, Верхояно-Колымской складчатой области и Усть-Ленской рифтовой зоны [Drachev et al., 1998]. Наряду с активным Хараулахским сегментом в районе выделяется сублинейная зона сильных ($M > 4$) событий вдоль Оленекской протоки в пределах Лено-Таймырской области приграничных поднятий (далее – Оленекский сегмент). Для анализа распределения локальных землетрясений в этом районе были использованы данные временного локального сейсмологического мониторинга в рамках международного проекта SIOLA. В результате обработки сейсмических записей сезона регистрации 2016–2017 гг. было получено 562 события в дельте р. Лены и ее окрестностях. Для локализации гипоцентров использовался алгоритм HYPOINVERSE. Скоростная модель коры составлена на основании данных профиля глубинного сейсмического зондирования «Кюсюр-дельта р. Лены». Координаты гипоцентров были уточнены методом двойных разностей при помощи алгоритма HypoDD.

На рис. 1 показано распределение гипоцентров землетрясений в Оленекском сегменте. Наблюдаемая сейсмичность сосредоточена в субмеридионально вытянутом кластере между Арынским и Терпейским разломами [Геологическая карта ..., 2014] – рис. 1а. Большая часть землетрясений в данном кластере (90 событий) являются афтершоками от события 24 ноября 2016 г. в 22:50:45 с $M_L = 3.1$, которое могло быть вызвано накоплением напряжений на опережающем разломе между соседними Арынским и Терпейским разломами.

По проекциям очагов на вертикальную плоскость вдоль профилей А-В (рис. 1б) и С-Д (рис. 1в) видно, что кластер событий формирует зону шириной ~10 км в пределах верхней и средней коры (8–25 км) под углом ~50°. Характеристики двух известных механизмов очагов вблизи данного кластера приведены в таблице. Параметры второй нодальной плоскости для ближайшего события II (угол простираания 130°, угол падения 60°) в целом соответствуют найденной ориентации облака гипоцентров выделенного кластера. Таким образом, большая часть очагов микроземлетрясений приурочена к разломной плоскости крупного события с магнитудой $M = 4.7$, произошедшего здесь 15 июня 1986 г.

Полученные в данной работе результаты могут найти применение при уточнении геометрии и параметризации активных разломов в дельте р. Лены, необходимых для разработки модели зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ).

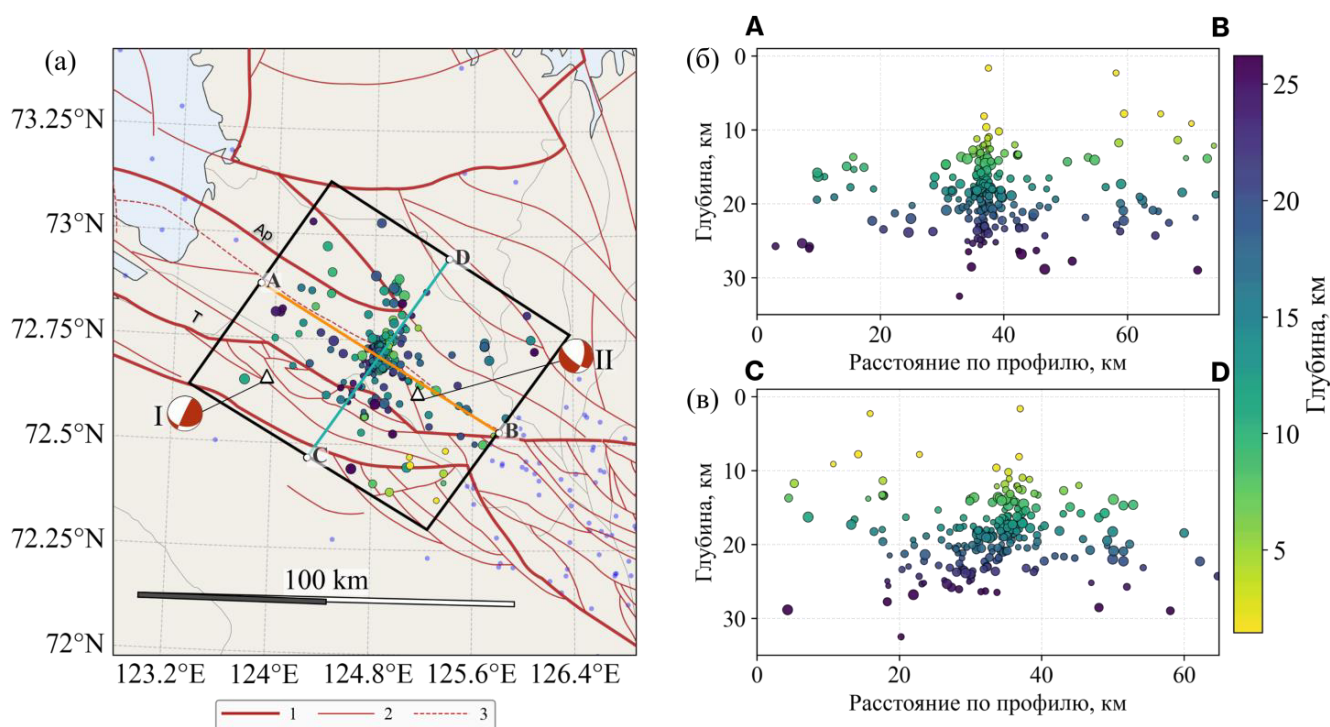


Рис. 1. Распределение гипоцентров землетрясений в сегменте вдоль Оленекской протоки: (а) – карта эпицентров с нанесенными профилями вдоль (AB) и вкост (CD) протоки, (1) – разломные границы тектонических блоков, (2), (3) – достоверные и предполагаемые внутриблоковые разломы [Государственная геологическая карта ..., 2014]; (б), (в) – разрез распределения глубин гипоцентров вдоль профилей AB и CD соответственно. Белые треугольники – механизмы очагов, приведенные в таблице [Seredkina, Melnikova, 2018]. Ар – Арынский разлом, Т – Терпейский разлом

Таблица. Механизмы очага в Оленекском сегменте [Seredkina, Melnikova, 2018]

№	Дата	Время	Широта, °	Долгота, °	M	Strike, °	Dip, °	Slip, °
I	08-06-2001	04:59:00	72.658	123.947	4.5	205	84	67
						101	24	165
II	15-06-1986	06:55:36	72.625	125.156	4.7	13	50	-38
						130	60	-134

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00125.

Литература

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Лаптево-Сибироморская. Лист S-51 Оленекский зал., S-52 – дельта р. Лены. СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2014.

Drachev S.S., Savostin L.A., Groshev V.G., Bruni I.E. Structure and geology of the continental shelf of the Laptev Sea, Eastern Russian Arctic // *Tectonophysics*. 1998. V. 298. P. 357–393. DOI: [10.1016/S0040-1951\(98\)00159-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00159-0) EDN: [KBTSYG](#)

Seredkina A.I., Melnikova V.I. New data on earthquake focal mechanisms in the Laptev Sea region of the Arctic-Asian seismic belt // *Journal of Seismology*. 2018. V. 22. P. 1211–1224. DOI: [10.1007/s10950-018-9762-9](https://doi.org/10.1007/s10950-018-9762-9) EDN: [KEGPYJ](#)

SPATIAL DISTRIBUTION OF SEISMICITY ALONG THE OLENEK CHANNEL (LENA–TAIMYR BOUNDARY UPLIFT ZONE)

Novikov M.A., Krylov A.A.

Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow

E-mail: mihail.novikov@mail.ru

РАСПОЗНАВАНИЕ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (M6+) НА САХАЛИНЕ

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

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

E-mail: onovikov@mitp.ru

(стендовый доклад)

Остров Сахалин расположен в западной части Охотской литосферной плиты, граничащей с Североамериканской, Евразийской и Тихоокеанской плитами. Сейсмичность Сахалина связана с системой субмеридиональных глубинных разломов [Харахинов и др., 1996], основной из которых – Центрально-Сахалинский – разделяет Охотскую и Евразийскую литосферные плиты. Движение этих плит друг относительно друга обуславливает высокую сейсмичность Сахалина.

Для территории Сахалина выполнено морфоструктурное районирование (МСР), на основе которого алгоритмом распознавания образов Кора-3 определены морфоструктурные узлы, в которых возможно возникновение землетрясений с $M \geq 6.0$. В результате МСР на Сахалине определено 56 узлов, образованных пересечениями линеаментов. На рисунке видно, что эпицентры землетрясений с M6+ расположены вблизи некоторых пересечений линеаментов, т.е. в морфоструктурных узлах. Приуроченность землетрясений к узлам позволяет применить алгоритмы распознавания образов для идентификации узлов, в которых возможны землетрясения с M6+. Выделенные с помощью МСР 56 узлов (см. рис.) составляют множество объектов распознавания для решения такой задачи.

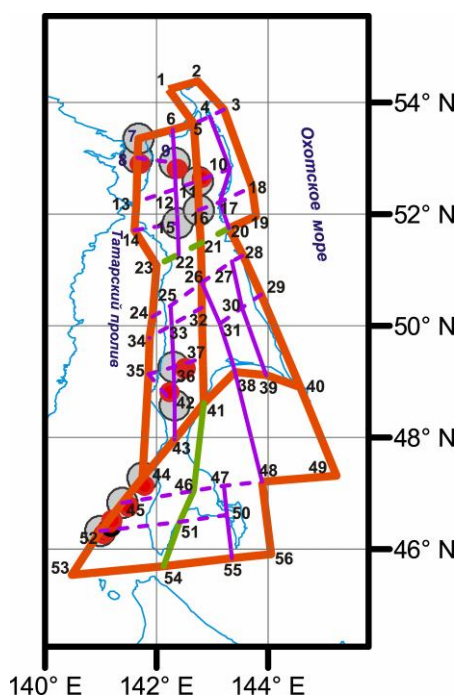


Рис. Схема морфоструктурного районирования Сахалина и результат распознавания высокосейсмичных узлов для M6+. Линиями разной толщины показаны морфоструктурные линеаменты: красные линии – линеаменты 1-го ранга, зеленые – линеаменты 2-го ранга, фиолетовые – линеаменты 3-го ранга. Сплошные линии – продольные линеаменты, пунктирные – поперечные. Цифрами показаны номера пересечений линеаментов (узлов). Красные кружки – эпицентры землетрясений с M6+. Серыми кругами показаны распознанные сейсмоопасные узлы для M6+

Все узлы, в которых известны землетрясения с $M6+$ (№№ 8, 9, 11, 36, 42, 44, 45, 52), в результате распознавания отнесены к высокосейсмичному классу **В**. Кроме них, как **В** распознаны три узла (№ 7, 15, 16), в которых до сегодняшнего дня событий такой магнитуды не зафиксировано. Все три потенциальных узла расположены в северной части Сахалина в районе Нефтегорского землетрясения и связаны с узлами, образованными линеаментами, оперяющими Центрально-Сахалинский разлом. В центральном и южном Сахалине, кроме тех узлов, где уже происходили землетрясения с $M6+$, других узлов такого сейсмического потенциала не выявлено.

Литература

Харахинов В.В., Туезов И.К., Бабошина В.А., Терещенков А.А. и др. Структура и динамика литосферы и астеносферы Охотоморского региона. М.: Национальный геофизический комитет РАН, 1996. 335 с.

RECOGNITION OF POTENTIAL EARTHQUAKE SITES ($M6+$) ON SAKHALIN

Novikova O.V., Gorshkov A.I., Semka M.A., Livinsky A.I.

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

E-mail: onovikov@mitp.ru

ВЛИЯНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ НАСТРОЕК НА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧНОСТИ

Петрушов А.А.^{1,2}, Смирнов В.Б.^{1,2}

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Физический факультет, г. Москва*

² *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

E-mail: petrushov.aa18@physics.msu.ru

(устный доклад)

Для выявления характерных этапов подготовки сильных землетрясений зачастую используются параметры сейсмичности, которые опираются на распределение очагов землетрясений в пространственно-временной области и по энергетическим характеристикам. Для прояснения особенностей процесса подготовки землетрясения, верификации и модификации моделей их подготовки поведение параметров сейсмичности детально исследуется для различных сейсмоактивных регионов апостериорно путем анализа расчетных пространственно-временных карт и выделения областей интереса, связанных с окрестностями произошедших землетрясений. На практике для решения задач выявления аномалий используются комплексный параметр сейсмического режима RTL и параметр Гутенберга – Рихтера (*b*-value) [Петрушов и др., 2024; Смирнов, Петрушов, 2025]. У соответствующих этим параметрам алгоритмов расчета имеется вариативность в виде набора настроечных коэффициентов и различных методов построения статистических оценок. Выбор конкретного набора значений коэффициентов может существенным образом влиять на расчетные результаты, отражая их алгоритмические особенности.

В ряде работ затрагивается вопрос о влиянии тех или иных настроек алгоритма расчета на поведение расчетных результатов [Sukrungsri, Pailoplee, 2015; Puangjaktha, Pailoplee, 2021; Gambino et al., 2014; Neanudorn, Pailoplee, 2022]. Однако в работах не поднимался вопрос о выявлении областей значений настроечных коэффициентов, которые в наибольшей или наименьшей степени влияют на получаемые оценки, не проводилась количественная оценка такого влияния.

В настоящем исследовании представлены результаты исследования устойчивости оценок параметров сейсмического режима RTL и *b*-value по отношению к значениям настроечных коэффициентов в соответствующих алгоритмах. Исследование проведено с использованием данных каталогов землетрясений Камчатки и Северной Калифорнии. Методика основана на расчете функции чувствительности, которая описывает степень изменчивости временных графиков параметров сейсмичности при вариации алгоритмических настроек. Подробнее о методике изложено в работе [Петрушов, Смирнов, 2025].

Под расчетной конфигурацией будем понимать привязку центра пространственного окна к определенной точке и выбор временного интервала для расчета. Для каждой расчетной конфигурации (приуроченной к конкретному сильному землетрясению) проведены многовариантные расчеты параметров RTL и b -value с различными значениями выбранных настроек алгоритмов, рассчитаны функции чувствительности. В качестве переменных настроек алгоритмов выбраны размер пространственного расчетного окна (выраженный через его радиус), пороговая магнитуда фильтрации каталога (для Камчатки – пороговый энергетический класс), а также два эмпирических коэффициента r_0 и t_0 для функции RTL. При определении функции чувствительности для конкретной настройки алгоритма проводилось последовательное изменение значений соответствующей настройки в заданном диапазоне, а остальные параметры алгоритма оставались постоянными в соответствии с их значениями по умолчанию. На рис. 1 представлено поточечное среднее по функциям чувствительности для настроек алгоритма расчета параметра RTL, каждая из которых оценена для конкретной расчетной конфигурации. Стандартное отклонение на графиках отражает факт различной изменчивости временных рядов параметра RTL для различных расчетных конфигураций. Малые значения стандартного отклонения свидетельствуют о преимущественно постоянной степени влияния соответствующей настройки алгоритма на изменчивость временных рядов. На рис. 2 представлено поточечное среднее по функциям чувствительности для настроек алгоритма расчета b -value. Средние функции чувствительности получены для обоих параметров сейсмичности и для расчетных конфигураций в двух рассматриваемых регионах (Камчатка и Северная Калифорния).

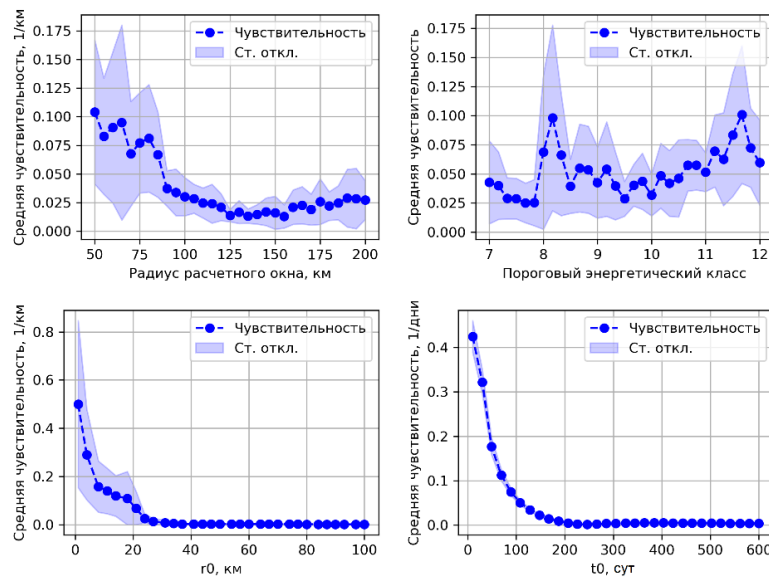


Рис. 1. Средние функции чувствительности параметра RTL для каталога Камчатки. Линия – поточечное среднее по функциям чувствительности, каждая из которых оценена для конкретной расчетной конфигурации. Закрашенная область около линии – стандартное отклонение функции чувствительности по различным расчетным конфигурациям. По оси абсцисс отложены значения варьируемой настройки алгоритма

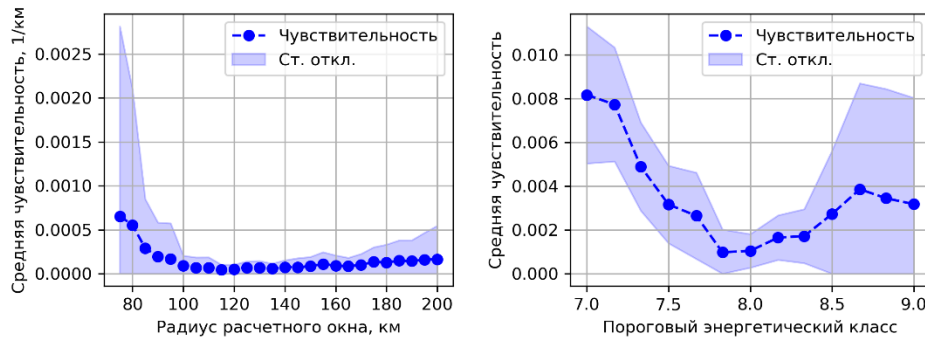


Рис. 2. Средние функции чувствительности параметра b -value для каталога Камчатки. Обозначения аналогичны рис. 1

Выявлен характерный вид влияния эмпирических коэффициентов r_0 и t_0 параметра RTL, при котором начиная с некоторых пороговых значений коэффициентов ($r_0^* \sim 30$ км и $t_0^* \sim 200$ сут) расчетные результаты перестают значимо изменяться. При этом в области малых значений ($r_0 < r_0^*$, $t_0 < t_0^*$) отмечается наибольшая чувствительность расчетных результатов к вариациям указанных эмпирических коэффициентов.

Средние функции чувствительности для размера расчетной области (как для RTL, так и для ПГР) свидетельствуют о большей степени влияния радиуса пространственного окна в области меньших его значений (менее 100–150 км). Функция чувствительности для пороговой магнитуды фильтрации каталога (для Камчатки – пороговый энергетический класс) не демонстрирует поведения с выраженными особенностями.

Полученные результаты дают статистическую основу для выбора алгоритмических настроек при расчете параметров сейсмического режима, а также позволяют оценить степень устойчивости получаемых оценок. Предложенная методика может быть использована для анализа устойчивости оценок любого параметра сейсмичности с учетом введения (при необходимости) наиболее подходящей метрики различия расчетных результатов.

Литература

- Петрушов А.А., Смирнов В.Б., Михайлов В.О., Фомина С.А. Особенности проявления аномалий сейсмического режима перед сильными землетрясениями Калифорнии // Физика Земли. 2024. № 5. С. 113–128. DOI: [10.31857/S0002333724050084](https://doi.org/10.31857/S0002333724050084) EDN: [EJVCWN](https://www.edn.ru/EJVCWN)
- Петрушов А.А., Смирнов В.Б. Устойчивость оценок параметров сейсмического режима RTL и Гутенберга – Рихтера // Геофизические исследования. 2025. № 4. (В печати).
- Смирнов В.Б., Петрушов А.А. О связи аномалий параметров сейсмического режима RTL и Гутенберга – Рихтера // Физика Земли. 2025. № 4. С. 4–20. DOI: [10.31857/S0002333725040014](https://doi.org/10.31857/S0002333725040014) EDN: [ROYUSO](https://www.edn.ru/ROYUSO)
- Gambino S., Laudani A., Mangiagli S. Seismicity Pattern Changes before the M = 4.8 Aeolian Archipelago (Italy) Earthquake of August 16, 2010 // The Scientific World Journal. 2014. 531212. DOI: [10.1155/2014/531212](https://doi.org/10.1155/2014/531212) EDN: [SREVIL](https://www.edn.ru/SREVIL)

- Neanudorn M., Pailoplee S.* Simultaneous Analysis of Seismicity Rate Change and Quiescence in the Thailand-Laos-Myanmar Borders: An Updated Prospective Earthquake Source // Bulletin of Earth Sciences of Thailand. 2022. V. 14. № 1. P. 92–104. retrieved from <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/bestjournal/article/view/248784>
- Puangjaktha P., Pailoplee S.* Evolution of Precursory Seismic Quiescence of the Mw-6.8 Nam Ma Earthquake, Thailand-Myanmar Borders // Bulletin of Earth Sciences of Thailand. 2021. V. 8. № 1. P. 1–15. retrieved from <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/bestjournal/article/view/246710>
- Sukrungsri S., Pailoplee S.* Precursory seismicity changes prior to major earthquakes along the Sumatra-Andaman subduction zone: a region-time-length algorithm approach // Earth, Planets and Space. 2015. V. 67. 97 DOI: [10.1186/s40623-015-0269-0](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0269-0) EDN: [UUSUND](https://ui.adsabs.org/abs/2015EPSC...67..097S)

THE INFLUENCE OF ALGORITHMIC SETTINGS ON SEISMICITY PARAMETER ESTIMATES

Petrushov A.A.^{1,2}, Smirnov V.B.^{1,2}

¹ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow*

² *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow*

E-mail: petrushov.aa18@physics.msu.ru

УСТОЙЧИВОСТЬ КОНВЕКТИВНЫХ ВАЛОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ, ВРАЩАЮЩЕМСЯ ОТНОСИТЕЛЬНО НАКЛОННОЙ ОСИ

Подвигина О.М.

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

E-mail: olgap@mitp.ru

(устный доклад)

Неустойчивость тепловой конвекции – одна из классических задач гидродинамики. Конвективные течения во вращающемся слое также актуальны для многих геофизических и астрофизических приложений, таких как течение расплава во внешнем ядре Земли или генерация магнитного поля звёзд и планет. Например, согласно современной парадигме, геомагнитное поле генерируется конвективными потоками во внешнем ядре [Glatzmaier, Roberts, 1995].

В докладе рассматривается устойчивость валов в плоском слое с жёсткими горизонтальными границами, вращающихся вокруг наклонной оси с угловой скоростью $(\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3) = \Omega \mathbf{e}$. Система в безразмерном виде характеризуется следующими параметрами: числами Рэлея, R , Прандтля, P , и числом Тейлора, $Ta = \tau^2$.

При малых числах Рэлея жидкость неподвижна, а при его увеличении возникает движение жидкости. В отсутствие вращения неустойчивость монотонна, а возникающее течение имеет вид двумерных валов. Во вращающемся слое конвекция детально изучена только для случая вертикальной оси. За исключением малых P и достаточно больших Ta , при установлении конвекции возникающее течение имеет вид двумерных валов, возможно, неустойчивых. Линейная устойчивость тривиального состояния для наклонной оси вращения была численно исследована в работе [Hathaway *et al.*, 1980], где было найдено, что наиболее неустойчивая мода имеет вид валов, ось которых параллельна горизонтальной компоненте угловой скорости.

Исследование конвективных течений мы начинаем с рассмотрения редуцированной задачи, в которой полагаем $\Omega_2 = 0$. Доказывается, что ее решение, не зависящее от y , является также решением полной задачи для произвольного Ω_2 (x, y – горизонтальные координаты, а z – вертикальная). В частности, конвективные валы, параллельные оси y , которые являются решением редуцированной задачи, остаются решением полной задачи для любого Ω_2 .

Для вычисления критического числа Рэлея возникновения конвекции мы следуем подходу [Pellew, Southwell, 1940]. Представляя неустойчивую моду (валы) в виде суммы произведений тригонометрических функций и экспонент, мы получаем нелинейную систему уравнений. Из этой системы определяется критическое число Рэлея для заданного

$\Omega = (\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3)$ и валов с волновым числом k и углом β между их осью и горизонтальной составляющей Ω . Минимизируя по β и k , мы получаем критическое R и критическое k .

Получено, что минимум числа Рэлея достигается при $\beta = 0$. Следовательно, критическое число Рэлея и волновое число наиболее неустойчивой моды известны из хорошо изученной задачи о возникновении конвекции в слое, вращающемся вокруг вертикальной оси. Отметим, что равенство $\beta = 0$ согласуется с расчетами в работе [Hathaway *et al.*, 1980].

Выберем систему координат с $\Omega_1 = 0$ и рассмотрим зависимость устойчивости валов от Ω_2 , численно интегрируя уравнения конвекции, предполагая горизонтальную квадратную ячейку периодичности. Построенные бифуркационные диаграммы при изменении R и фиксированных остальных параметрах показывают, что область R устойчивости валов увеличивается вместе с Ω_2 . При потере устойчивости конвективных валов возникают искривленные валы или бегущая волна.

Литература

- Glatzmaier G.A., Roberts P.H. A Three-Dimensional Self-Consistent Computer Simulation of a Geomagnetic Field Reversal // *Nature*. 1995. V. 377. P. 203–209. DOI: [10.1038/377203a0](https://doi.org/10.1038/377203a0) EDN: [XXOGJZ](https://www.edn.ru/xxogjz)
- Hathaway D.H., Toomre J., Gilman P.A. Convective instability when the temperature gradient and rotation vector are oblique to gravity. II. Real fluids with effects of diffusion // *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*. 1980. V. 15. P. 7–37. DOI: [10.1080/03091928008241168](https://doi.org/10.1080/03091928008241168)
- Pellew A., Southwell R.V. On maintained convective motion in a fluid heated from below // *Proceedings of the Royal Society A*. 1940. V. 176. P. 312–343. DOI: [10.1098/rspa.1940.0092](https://doi.org/10.1098/rspa.1940.0092)

STABILITY OF CONVECTIVE ROLLS IN A HORIZONTAL LAYER ROTATING ABOUT AN OBLIQUE AXIS

Podvigina O.

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

E-mail: olgap@mitp.ru

АКТУАЛЬНЫЙ РОССИЙСКИЙ НАУЧНЫЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕБ-ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В СЕЙСМОЛОГИИ

Подольская Е.С.^{1,2}, Некрасова А.К.¹, Прохорова Т.В.¹, Селюцкая О.В.¹, Трубенков А.В.¹

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва

E-mail: ekaterina.podolskaia@gmail.com

(устный доклад)

Технологии веб-ГИС используются для представления результатов научных проектов с пространственными данными широкого круга тематических направлений. Мониторинг тектонических процессов и сейсмической активности, построение и актуализация карт сейсмической опасности и сейсмического риска как в глобальном, так и в региональных масштабах требуют своевременного отображения, реализуемого в веб-ГИС [Podolskaia et al., 2022]. Представлен анализ технологий веб-ГИС в научной российской сейсмологии: систематизированы актуальные на осень 2025 г. проекты, проведено их сопоставление по используемой технологии, функционалу, содержанию, возможности передачи научного опыта и данных пользователям.

Дана характеристика веб-ГИС проектов Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики (ИТПЗ РАН), развернутых при помощи сервера QGIS в IT-инфраструктуре Института. Интерактивные геоинформационные проекты Института содержат данные по трем темам научных исследований: «Глобальный тест по прогнозу в реальном времени сильнейших землетрясений мира» [Кособоков, Щепалина, 2020; Ismail-Zadeh, Kossobokov, 2021], «Линеаменты и места возможного возникновения сильных землетрясений» [Gorshkov, Soloviev, 2022] и база данных «Механизмы очагов землетрясений Восточной Арктики» [Филиппова и др., 2024]. Первый показывает результаты среднесрочного прогноза по алгоритму М8 в глобальном масштабе, второй – результаты распознавания степени сейсмической опасности пересечения линеаментов различного ранга, полученных в результате авторского морфоструктурного районирования для ряда регионов мира (Итальянский регион, Центральный Французский массив, Пиренейский полуостров, а также Черноморско-Каспийский регион и Южная Сибирь), представленные как базы геоданных и зарегистрированные в Роспатенте как объекты интеллектуальной собственности, примером серии является работа [Подольская и др., 2024]. Графический анализ содержания российских научных сейсмологических исследований с использованием веб-ГИС представлен облаком слов названий статей. Отмечен тренд сейсмологических веб-ГИС как сред интеграции и аналитики. Представлен пример совместного использования и развития веб-ГИС в научной академической организации и вузе.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук (ИТПЗ РАН).

Литература

- 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) EDN: [NHRORL](https://nhrorl.ru)
- Подольская Е.С., Горшков А.И., Новикова О.В., Трубенков А.В. База геоданных линеаментов и сейсмогенных узлов Южной Сибири для ГИС. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024623735. 2024. EDN: [HVUVNC](https://hvuvnc.ru)
- Филиппова А.И., Бурлаков И.С., Фомочкина А.С. База данных механизмов очагов землетрясений Восточной Арктики // Физика Земли. 2024. № 5. С. 210–224. DOI: [10.31857/S0002333724050153](https://doi.org/10.31857/S0002333724050153) EDN: [EIWPIR](https://eiwpir.ru)
- Gorshkov A., Soloviev A. Morphostructural zoning for identifying earthquake-prone areas // Earthquakes and sustainable infrastructure: neodeterministic (NDSHA) approach guarantees prevention rather than cure / Panza G.F., Kossobokov V.G., Laor E., De Vivo B. (eds.). Elsevier, 2022. P. 135–149. DOI: [10.1016/B978-0-12-823503-4.00009-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823503-4.00009-9)
- Ismail-Zadeh A., Kossobokov V. Earthquake Prediction, M8 Algorithm // Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series / H. Gupta (ed.). Springer, Cham, 2021. P. 204–208. DOI: [10.1007/978-3-030-10475-7_157-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_157-1)
- Podolskaia E., Nekrasova A., Prokhorova T., Trubenkov A., Selyutskaya O. Web-gis projects at the Institute of Earthquake prediction theory and mathematical geophysics, Russian Academy of Sciences (IEPT RAS) // 8th International Conference on Cartography and GIS, 20-25 June 2022, Nessebar, Bulgaria. Proceedings. V. 2. Sofia: Bulgarian Cartographic Association, 2022. P. 237–243. ISSN: 1314-0604

ACTUAL RUSSIAN SCIENTIFIC EXPERIENCE OF USING WEB-BASED GEOINFORMATION SYSTEMS IN SEISMOLOGY

Podolskaia E.S.^{1,2}, Nekrasova A.K.¹, Prokhorova T.V.¹, Selyutskaya O.V.¹, Trubenkov A.V.¹

¹ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

² National Research University “Higher School of Economics”, Moscow

E-mail: ekaterina.podolskaia@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАБЕЛЯ НА СИГНАЛ DAS В СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

Пономарёв И.С.^{1,2}, Фомиряков Э.А.¹, Харасов Д.Р.¹, Наний О.Е.^{1,2}, Трещиков В.Н.¹

¹ ООО «Т8», г. Москва

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

E-mail: ponomarev@t8.ru

(устный доклад)

Распределенные акустические датчики (DAS) на рэлеевском рассеянии становятся новым перспективным способом решения задач геофизики [Mestayer et al., 2012]. У таких датчиков есть несколько преимуществ по сравнению с сейсмической косой классических геофонов, а именно: масштабируемость покрываемой площади (один прибор может зондировать волоконную линию длиной до 50 км при частоте опроса 2 кГц) и автономность (волоконная линия является пассивным чувствительным элементом, т.е. не требует электропитания) [Nikitin et al., 2023].

Одним из ключевых факторов, определяющих возможность применения DAS в задачах геофизики, является геометрия кабеля. Например, DAS в конфигурации стандартного прямого кабеля может применяться для решения таких задач сейсморазведки, как вертикальное сейсмическое профилирование, и инженерной сейсморазведки методом многоканального анализа поверхностных волн (MASW) [Correa et al., 2019]. При этом диаграммы направленности прямого волокна для *P*- и *S*-волн имеют особенности при падении волны под большим углом к кабелю [Shatalin et al., 2021], затрудняющие применение DAS в задачах межскважинного профилирования и наземной 2D- и 3D-сейсморазведки методом отраженных волн. Более равномерная диаграмма направленности для *P*-волн достигается при использовании в составе DAS кабеля со спиральной намоткой волокна [Chugaev, Tarantin, 2023], таким образом, становится возможным решение задачи межскважинного профилирования с помощью DAS. Альтернатива кабелю со спиральной намоткой – это использование кабеля, свёрнутого в кольца или вытянутого в овал. Каждый моток представляет собой точечный датчик – аналог классического геофона. Далее такую конструкцию будем называть волоконно-оптический геофон (ВОГ). В работе [Харасов и др., 2025] нами было показано, что «кольцевой» ВОГ регистрирует те же продольные отражённые волны, что и классический геофон, что делает возможным применение DAS для наземной полевой сейсморазведки.

В данной работе проводилось дальнейшее сравнение влияния различных геометрий волокна на отклик DAS. На рисунке ниже представлены результаты (сейсмограммы) для разных пунктов возбуждения (ПВ) эксперимента, в котором физическая длина профиля

наблюдений составляла 300 метров для прямого кабеля, 100 метров для спирального кабеля, 300 метров для «кольцевого» ВОГ.

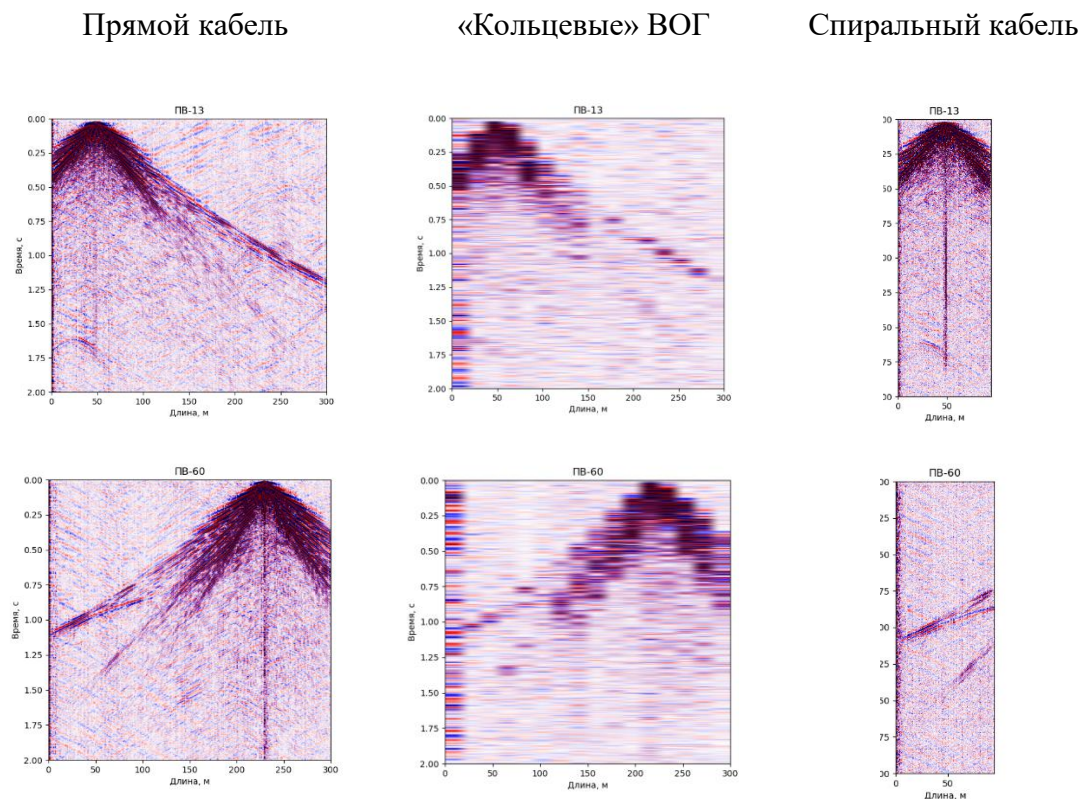


Рис. Виброграммы для ПВ-13 (первый ряд) и ПВ-60 (второй ряд).
Шаг между пунктами ПВ составлял 4 метра

На сейсмограммах для всех геометрий волокна видны возбуждения от источника (кувалда): формы сигнала воздействий совпадают, также как и скорости волн. В дальнейшем будут исследованы методы обработки полученных данных для повышения отношения сигнал-шум (помеха), способы выделения полезного сигнала на фоне помех, а также проведено сравнение данных DAS с данными классических сейсмоприёмников.

Литература

- Харасов Д.Р., Спиридонов Е.П., Наний О.Е., Ашкар Г.Х., Трещиков В.Н., Дучков А.А., Яскевич С.В., Яблоков А.В., Белов М.В. Технология DAS – развенчание заблуждений и перспективы // Приборы и системы разведочной геофизики. 2025. Т. 2. № 85. С. 24–33. EDN: [PYEAFI](#)
- Chugaev A.V., Tarantin M.V. Amplitude-frequency response of a helically-wound fiber distributed acoustic sensor (DAS) // Mining Science and Technology (Russia). 2023. Т. 8. № 1. С. 13–21. DOI: [10.17073/2500-0632-2022-06-10](#) EDN: [ZPCYDK](#)
- Correa J., Pevzner R., Bona A., Tertyshnikov K., Freifeld B., Robertson M., Daley T. 3D vertical seismic profile acquired with distributed acoustic sensing on tubing installation: A case study from the CO2CRC Otway Project // Interpretation. 2019. V. 7. № 1. P. SA11–SA19. DOI: [10.1190/INT-2018-0086.1](#)

- Mestayer J., Grandi Karam S., Cox B., Wills P., Mateeva A., Lopez J., Hill D., Lewis A.* Distributed Acoustic Sensing for Geophysical Monitoring // 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012. European Association of Geoscientists & Engineers, 2012. cp-293-00804. DOI: [10.3997/2214-4609.20148800](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20148800)
- 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. T. 66. № 5. С. 854–859. DOI: [10.1134/S0020441223050196](https://doi.org/10.1134/S0020441223050196) EDN: [WHSUUU](https://www.edn.ru/whsuuu)
- Shatalin S., Parker T., Farhadiroushan M.* High Definition Seismic and Microseismic Data Acquisition Using Distributed and Engineered Fiber Optic Acoustic Sensors // Distributed acoustic sensing in geophysics: Methods and applications. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2021. С. 1–32. DOI: [10.1002/9781119521808.ch1](https://doi.org/10.1002/9781119521808.ch1)

INFLUENCE OF CABLE GEOMETRY ON THE DAS SIGNAL IN SEISMIC EXPLORATION

Ponomarev I.S.^{1,2}, Fomiryakov E.A.¹, Kharasov D.R.¹, Nanii O.E.^{1,2}, Treshchikov V.N.¹

¹ LLC T8, Moscow

² Lomonosov Moscow State University, Moscow

E-mail: ponomarev@t8.ru

ХУБСУГУЛЬСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 11 ЯНВАРЯ 2021 Г.: АНАЛИЗ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Радзиминович Я.Б.^{1,2}, Гилёва Н.А.¹, Филиппова А.И.^{2,3}, Мельникова В.И.⁴

¹ Байкальский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Иркутск

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

³ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн

им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк

⁴ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

E-mail: yan.radziminovich@gmail.com

(стендовый доклад)

Хубсугульское землетрясение ($M_w = 6.8$, $M_S = 7.1$), произошедшее 11 января 2021 г. в акватории оз. Хубсугул [Еманов и др., 2022], стало наиболее сильным сейсмическим событием в пределах региона Прибайкалье и Забайкалье после Могодского землетрясения 5 января 1967 г. ($M_{\text{ЛН}} = 7.8$). Макросейсмические данные были собраны главным образом посредством онлайн-анкетирования населения Восточной Сибири; кроме того, были получены отдельные сообщения от сотрудников сейсмических станций региональных сетей Байкальского и Алтае-Саянского филиалов ФИЦ ЕГС РАН. В ограниченном объеме были также использованы сообщения СМИ.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие заключения:

1. Макросейсмические данные были получены из 158 населенных пунктов России и Монголии. В пределах Российской Федерации Хубсугульское землетрясение ощущалось на эпицентральных расстояниях от 62 км (п. Монды, VI–VII баллов) до 1231 км (г. Новосибирск, II балла). Затухание сейсмических колебаний в данном случае, в отличие от других сильных сейсмических событий Прибайкалья, довольно хорошо соответствует региональному макросейсмическому уравнению. Следует отметить, что на наибольших эпицентральных расстояниях (~900–1200 км) землетрясение было замечено главным образом в пунктах, характеризующихся наличием высотной застройки.

2. Хубсугульское землетрясение вызвало весьма острую реакцию очевидцев. Это следует прежде всего из рекордного числа обращений к интернет-сайту БФ ФИЦ ЕГС РАН, составившего в день события 54803. Согласно статистике посещений сайта (с 2011 г.), ни до, ни после Хубсугульского землетрясения такое количество обращений к сайту в течение одного дня не фиксировалось. Интересно отметить, что количество сообщений о макросейсмических эффектах, поступивших от респондентов (1961), оказалось заметно ниже ожидаемого, особенно на фоне очень высокой посещаемости сайта. Для сравнения укажем, что после Быстринского землетрясения 21 сентября 2020 г. ($M_w = 5.6$) было получено 3013 сообщений (при ~32500 обращениях к сайту) [Радзиминович и др., 2024].

3. Скорость поступления откликов очевидцев в зависимости от времени, прошедшего с момента Хубсугульского землетрясения, хорошо соответствует логарифмическому закону. Такая же закономерность неоднократно наблюдалась и ранее при умеренных и сильных землетрясениях Прибайкалья. Это позволяет в первом приближении прогнозировать уровень общественного интереса к произошедшему сейсмическому событию, по меньшей мере в течение первых суток.

4. Хубсугульское землетрясение прямым образом подтвердило высокий сейсмический потенциал ($M \sim 7.0$) активных разломов, ограничивающих борта впадины оз. Хубсугул, ранее оцениваемый лишь по косвенным признакам.

Таким образом, Хубсугульское землетрясение 11 января 2021 г. представляет значительный интерес в аспекте дальнейшего развития макросейсмических исследований в Восточной Сибири. Полученные данные могут быть использованы в работах по уточнению сейсмической опасности и оценке сейсмического риска.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (в рамках государственных заданий № 075-00604-25 и № 124020900029-7) 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

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Чечельницкий В.В., Шевкунова Е.В., Радзиминович Я.Б., Фатеев А.В., Кобелева Е.А., Гладышев Е.А., Арапов В.В., Артёмова А.И., Подкорытова В.Г. Хубсугульское землетрясение, 12.01.2021 г. $M_w = 6.7$, $M_L = 6.9$ и афтершоки начального периода // Физика Земли. 2022. № 1. С. 67–82. DOI: [10.31857/S0002333722010021](https://doi.org/10.31857/S0002333722010021) EDN: [PADCYH](https://www.edn.ru/PADCYH)

Радзиминович Я.Б., Новопашина А.В., Лухнева О.Ф., Гилёва Н.А., Кузьмина Е.А. Быстринское землетрясение 21.09.2020 г. ($M_w=5.6$) на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны: веха в макросейсмических исследованиях в Восточной Сибири // Физика Земли. 2024. № 5. С. 136–156. DOI: [10.31857/S0002333724050108](https://doi.org/10.31857/S0002333724050108) EDN: [EJTBXT](https://www.edn.ru/EJTBXT)

THE JANUARY 11, 2021, KHÖVSGÖL EARTHQUAKE: MACROSEISMIC DATA ANALYSIS

Radziminovich Ya.B.^{1,2}, Gileva N.A.¹, Filippova A.I.^{2,3}, Melnikova V.I.⁴

¹ Baikal Branch, Geophysical Survey, RAS, Irkutsk

² Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

³ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave
Propagation, RAS, Moscow, Troitsk

⁴ Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk

E-mail: yan.radziminovich@gmail.com

О ПРОГНОЗЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА ТИПИЧНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВЫХ АНОМАЛИЙ, ТЕКУЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ТРУДНОСТИ

Родкин М.В.^{1,2}

¹ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*

² *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

E-mail: rodkin@mitp.ru

(устный доклад)

Проверка в реальном времени показала, что наиболее удачные методики прогноза землетрясений дают результаты много лучше случайного угадывания, но еще не удовлетворяют практическим требованиям [Соболев, Пономарев, 2003; Jordan et al., 2011; Кособоков, Соловьев, 2015; и др.]. Считается, что успешный прогноз затруднен сильной изменчивостью сейсмического режима, затрудняющей своевременное (а не апостериори) выявление предвестников. Известно также, что физика разноглубинных землетрясений различна, соответственно могут различаться и их предвестники. Использование метода обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) позволяет преодолеть обе эти трудности, существенно уточняя характер предвестников и выявляя их различия для разноглубинных землетрясений [Rodkin, Tikhonov, 2016; Родкин, 2020; и др.]. Результатом применения метода ООСЗ является комплекс параметризованных типовых (средних) предвестниковых аномалий. Некоторые из этих аномалий различаются для разноглубинных землетрясений.

В ООСЗ были детально описаны форшоковый степенной каскад и аномалии ряда других характеристик сейсмического режима (b -value, средней глубины землетрясений, величин кажущихся напряжений, разница магнитуд M_w и M_b и др.). По данным обычного каталога землетрясений можно надеяться выявить три аномалии: степенного роста форшокового каскада и уменьшения b -value, и средней глубины землетрясений. Все эти аномалии увеличивают свою амплитуду пропорционально логарифму времени до момента сильного события (отвлекаясь от второстепенных особенностей у ряда аномалий вблизи сильного события). Характерная длительность аномалий, когда их амплитуда в ООСЗ становится неотличима от фона, составляет около 100 дней.

По данным мировых ISC-GEM и GCMT каталогов землетрясений, региональных каталогов Камчатки и Японии (JMA) и окрестностей дуплета сильных Турецких землетрясений (2023), сильнейшего Камчатского землетрясения (2025) и мегаземлетрясений Андаманского и Тохоку проверялось, насколько часто и систематически типовые ООСЗ аномалии могут быть выявлены в форшоковых областях отдельных сильных землетрясений.

На основе такого, весьма представительного, сравнения было показано, что достаточно часто в форшоковой области данного сильного события регистрируется сразу

несколько ООСЗ аномалий. Также выяснилось, что вероятность статистически значимого выявления прогнозных ООСЗ аномалий возрастает с магнитудой сильного события и увеличением детальности каталога. А именно, что достаточно высокая (80% и более) вероятность выявления в форшоковой окрестности данного целевого события с магнитудой M_0 по крайней мере одной прогнозной ООСЗ аномалии имеет место для каталогов с уровнем надежной регистрации $M_c = M_0 - 4$. Такой результат представляется полезным для проектирования систем сейсмического мониторинга. Заметим также, что этим может объясняться уменьшение эффективности алгоритма прогноза M8 при его расширении для прогноза событий M7.5.

В применении описанного метода к прогнозу на данном этапе выявляются, по крайней мере, два серьезных препятствия. Во-первых, выявляется довольно много ложных тревог. Во-вторых, подготовка сильного события может маскироваться сильной афтершоковой последовательностью сильного форшока основного события. Обсуждаются возможные пути преодоления указанных трудностей.

Литература

- Кособоков В.Г., Соловьев А.А. Об оценке результатов тестирования алгоритмов прогноза землетрясений // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460. № 6. С. 710–712. DOI: [10.7868/S0869565215060213](https://doi.org/10.7868/S0869565215060213) EDN: [TJFSPD](https://www.edn.ru/TJFSPD)
- Родкин М.В. Типовая фор- и афтершоковая аномалия – эмпирика, интерпретация, применение // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 64–76. DOI: [10.31857/S020303062001006X](https://doi.org/10.31857/S020303062001006X) EDN: [OOTILR](https://www.edn.ru/OOTILR)
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 273 с. EDN: [RVEBFL](https://www.edn.ru/RVEBFL)
- Jordan T.H., Chen Y.-T., Gasparini P., Madariaga R., Main I., Marzocchi W., Papadopoulos G., Sobolev G., Yamaoka K., Zschau J. Operational earthquake forecasting – state of knowledge and guidelines for utilization // Annals Geophysics. 2011. V. 54. № 4. P. 319–391. DOI: [10.4401/ag-5350](https://doi.org/10.4401/ag-5350) EDN: [PEAWHV](https://www.edn.ru/PEAWHV)
- 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) EDN: [YUULUT](https://www.edn.ru/YUULUT)

EARTHQUAKE FORECASTING BASED ON A SET OF TYPICAL PRECURSOR ANOMALIES: CURRENT RESULTS AND CHALLENGES

Rodkin M.V.^{1,2}

¹ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

E-mail: rodkin@mitp.ru

О МУЛЬТИМОДЕЛЬНОСТИ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ИХ ПРОГНОЗЕ (НА ПРИМЕРЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ)

Ружич В.В., Левина Е.А.

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

E-mail: ruzhigh@crust.irk.ru

(устный доклад)

Среди наиболее известных моделей очагов землетрясений (ОЗ), разработанных в прошлом веке, наиболее популярны такие, как ДД (Берридж, Кнопофф), ЛНТ (Соболев), Stick-slip (Scholz). В течение последних десятилетий получены новые сведения о подготовке ОЗ, выявленные при проведении натурных и лабораторных экспериментов, а также путем детального геолого-геофизического изучения эксгумированных очагов палеоземлетрясений. В частности, показано, что ключевым условием возникновения ОЗ являются процессы трения при скольжении в сегментах зон разломов, возникающие при контактном взаимодействии неровностей, при разрушении прочностных барьеров, а также в местах расположения разломных узлов [Соболев, 1993; Ружич, 1997; Кочарян, 2016]. Наряду с этим, выявлена весьма важная роль флюидов, влияющих на скорости скольжения в разломах при подготовке ОЗ, а также и на процессы залечивания в косейсмических разрывах. Существенно расширились представления о роли космогенных и эндогенных энергетических источников, влияющих на пространственные и временные деструктивные условия на планетарном уровне. Выше упомянутые модели нет оснований рассматривать как универсальные из-за геолого-структурного разнообразия условий подготовки ОЗ в разных регионах Земли. Следовательно, необходимо создание региональных моделей.

Как пример ниже представлена феноменологическая региональная двухстадийная модель, разработанная для улучшения среднесрочного прогноза землетрясений с $K \geq 15$ применительно к сеймодинамическому режиму Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) [Ружич, Левина, 2024]. В модели анализируются две типичные стадии: предшоковой активизации и сейсмического затишья, проявляющихся в местах сейсмических брешей в разломах, где возникают условия ускоренного слияния разрывных нарушений при начинающемся разрушении прочностных барьеров перед шоковым событием и последующим возникновением магистрального косейсмического разрыва [Соболев, 1993; Ружич, 1997]. Согласно анализу каталога оценивались параметры энергии ожидаемых событий, длительности сейсмического затишья и выявлялись места подготовки ОЗ. С этой целью для окрестности брешы строилось распределение выделившейся сейсмической энергии, подсчитанное с помощью временного окна, и осуществлялся поиск предшоковой активизации путем выявления локального максимума временного ряда. Проведенное

формализованное выделение сейсмических брешей в сочетании с наличием сейсмоактивных разломов или разломных узлов позволило установить, что все события с $K \geq 15$, произошедшие в БРЗ с 1963 по 2022 годы, возникли либо в самой брешке, либо в ячейке активизации, соседней с сейсмической брешью. Для всех них также имела место предшоковая активизация. Выявленное соотношение энергии максимального предшокового события и ожидаемого главного шока составляло в среднем 2.3 ($\sigma = 0.7$). Связь длительности сейсмического затишья с энергией последующего землетрясения составляла в среднем 5.7 ($\sigma = 3.4$) лет и определялась менее надежно. С целью последующего уточнения критически важного параметра «время ожидания» авторами предлагается использовать оперативные сведения, поступающие с созданных геодинамических полигонов в прогнозируемых опасных местах [Ружич, Левина, 2024].

В заключение заслуживает упоминания еще один тезис о том, что наиболее надежный способ обеспечения сейсмической безопасности в районах готовящихся ОЗ может быть реализован при уточнении их среднесрочного прогноза и последующего применения техногенных воздействий для демпфирования угрозы возникновения разрушительных последствий от готовящихся землетрясений [Ружич и др., 2020].

Литература

- Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 432 с.
- Ружич В.В. Сейсмотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.
- Ружич В.В., Вахромеев А.Г., Левина Е.А., Сверкунов С.А., Шилько Е.В. Об управлении режимами сейсмической активности в сегментах тектонических разломов с применением вибрационных воздействий и закачки растворов через скважины // Физическая мезомеханика. 2020. № 3. С. 54–69. DOI: [10.24411/1683-805X-2020-13006](https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-13006) EDN: [EKXRTN](https://www.edn.ru/EKXRTN)
- Ружич В.В., Левина Е.А. Об использовании данных среднесрочного прогноза для Байкальской рифтовой зоны при оценках сейсмической опасности // Физика Земли. 2024. № 5. С. 183–194. DOI: [10.31857/S0002333724050138](https://doi.org/10.31857/S0002333724050138) EDN: [EJGTLY](https://www.edn.ru/EJGTLY)
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 310 с.

ON THE MULTI-MODELING OF EARTHQUAKE FOCI AND THEIR PREDICTION (USING THE BAIKAL RIFT ZONE AS AN EXAMPLE)

Ruzhich V.V., Levina E.A.

Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk

E-mail: ruzhigh@crust.irk.ru

РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В АНОМАЛЬНО СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ ГЕОСИСТЕМАХ: ИЛЛЮСТРАЦИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НА ОДНОМЕРНЫХ МОДЕЛЯХ

Рыжак Е.И., Синюхина С.В.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

E-mail: E_I_Ryzhak@mail.ru

(стендовый доклад)

Вопрос о темпе развития неустойчивости в тяжелых вязкоупругих геосистемах с аномальным распределением плотности по глубине исследуется на модельных задачах (рис. 1 – рис. 3), в которых зависимости от смещений как гравитационных сил, порождающих неустойчивость, так и вязкоупругих сил, препятствующих неустойчивости, структурно аналогичны соответствующим зависимостям в геосистемах [Рыжак, Синюхина, 2022; 2023]. Исследуются модели вязкоупругости Фойхта и Максвелла, и принимается модель Максвелла, поскольку именно она, с учетом огромной вязкости геоматериалов, позволяет, в отличие от других моделей вязкоупругости, адекватно описывать динамику геосистем [Рыжак, Синюхина, 2024]. Наряду с вязкоупругими системами (ВУС) рассматриваются соответствующие им упругие системы сравнения (УСС) (рис. 4). Получено, что в случае неустойчивости последних развитие неустойчивости вязкоупругих систем при любой вязкости происходит быстрее, чем в системах сравнения. При увеличении вязкости темп развития неустойчивости в вязкоупругих системах стремится сверху к темпу развития неустойчивости в системах сравнения. В случае устойчивости систем сравнения вязкоупругие системы неустойчивы, но темп развития их неустойчивости ничтожно мал. Именно в этом и только в этом случае вязкость замедляет этот темп, и при огромной вязкости такая неустойчивость малозаметна на реальных временах наблюдения. Делается вывод, что исследование неустойчивости геосистем, основанное на изучении упругих систем сравнения, делает возможным выявление существенных закономерностей процесса развития неустойчивости.

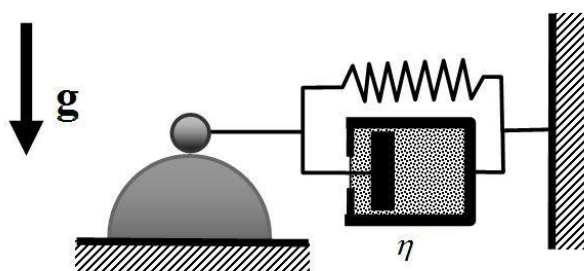


Рис. 1. ВУС типа Фойхта с одной степенью свободы

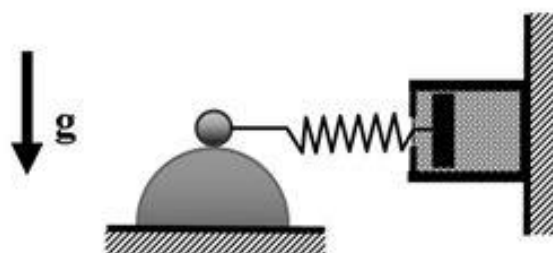


Рис. 2. Неустойчивая ВУС типа Максвелла с одной степенью свободы

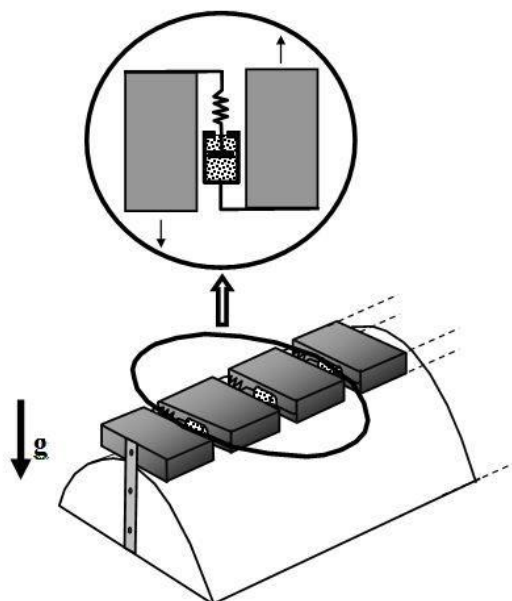


Рис. 3. Распределенная одномерная ВУС

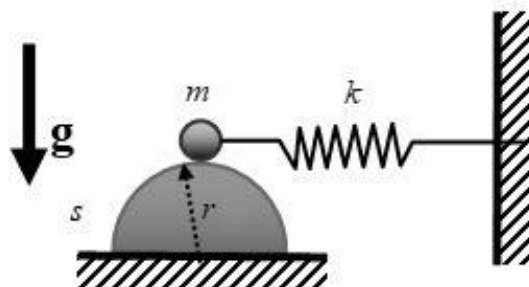


Рис. 4. Консервативная УСС с одной степенью свободы

Литература

- Рыжак Е.И., Синюхина С.В. К вопросу о темпе процессов развития неустойчивости в геосистемах // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 236–242. DOI: [10.31857/S2686739722601223](https://doi.org/10.31857/S2686739722601223) EDN: [UEHYMP](https://www.edn.ru/UEHYMP)
- Рыжак Е.И., Синюхина С.В. О влиянии вязкости на развитие неустойчивости в аномально стратифицированных геосистемах // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 508. № 2. С. 258–264. DOI: [10.31857/S2686739722602435](https://doi.org/10.31857/S2686739722602435) EDN: [SWXUCH](https://www.edn.ru/SWXUCH)
- Рыжак Е.И., Синюхина С.В. О критерии отбора моделей вязкоупругости для описания неустойчивого поведения геосистем // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 519. № 2. С. 110–119. DOI: [10.31857/S2686739724120143](https://doi.org/10.31857/S2686739724120143) EDN: [KVQPEO](https://www.edn.ru/KVQPEO)

THE INSTABILITY DEVELOPMENT IN ANOMALOUSLY STRATIFIED VISCOELASTIC GEOSYSTEMS: ILLUSTRATION OF REGULARITIES BY MEANS OF ONE-DIMENSIONAL MODELS

Ryzhak E.I., Sinyukhina S.V.

Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

E-mail: E.I.Ryzhak@mail.ru

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ МЕСТА СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ТИХООКЕАНСКОМ ПОЯСЕ И ЗОНДСКОЙ ДУГЕ

Семка М.А., Горшков А.И.

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

E-mail: khemul1996@mail.ru

(устный доклад)

Тихоокеанское кольцо – наиболее сейсмоактивная область Земли, в которой происходит абсолютное большинство событий с $M \geq 8$. Подтверждением высокого потенциала Тихоокеанского пояса стало недавнее Камчатское землетрясение 29 июля 2025 г., $M_w = 8.8$. Целью работы является выявление потенциальных мест землетрясений методами распознавания для двух пороговых магнитуд: $M 8.0 \div 8.4$ и $M 8.5+$. Для оценки сейсмического потенциала Тихоокеанских зон субдукции используются различные подходы. Впервые в пределах всего Тихоокеанского пояса потенциальные места землетрясений для $M 8.2+$ были определены в [Гвишиани и др., 1978; 1981] с помощью распознавания образов на основе морфометрических параметров. В последнее десятилетие в ряде работ при разделении зон субдукции на сегменты различного сейсмического потенциала исследовались большие наборы параметров с помощью машинного обучения и корреляционного анализа [Schellart, Rawlinson, 2013; Schäfer, Wenzel, 2019].

В данной работе выявление потенциальных землетрясений для двух значений пороговой магнитуды M_0 ($M 8.0 \div 8.4$ и $M 8.5+$) проведено с помощью алгоритма распознавания образов с обучением Кора-3 на основе параметров, базирующихся на морфометрических и гравито-магнитных данных, а также показателей геометрии зон субдукции. Множество объектов распознавания составили 209 объектов, представленные кругами радиуса 300 км, центры которых расположены вдоль глубоководных желобов с шагом в 300 км. Задача распознавания состояла в разделении всех 209 объектов на класс В, где могут происходить землетрясения $M \geq M_0$, и класс Н, где события такой силы невозможны. На рисунке представлены результаты распознавания для $M 8.5+$ в пределах всего Тихоокеанского пояса и Зондской дуги. Кроме того, для обеих пороговых магнитуд по отдельности решены задачи распознавания для западного и восточного обрамления Тихого океана, а также Алеутской и Зондской дуг. Результаты исследования позволили выявить в изученных регионах значительное количество мест, где еще не фиксировались события рассмотренных магнитуд. Это позволит существенно улучшить оценки сейсмической опасности прибрежных областей Тихого океана и Зондского архипелага.

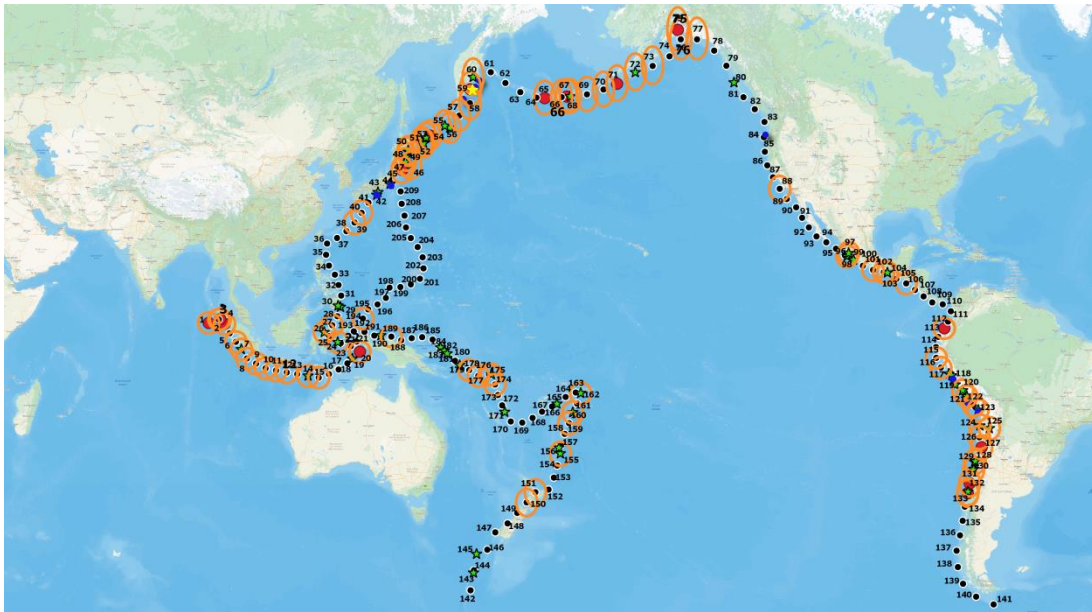


Рис. Результат распознавания мест землетрясений для $M8.5+$ в Тихоокеанском поясе и Зондской дуге

Литература

- Гвишиани А.Д., Зелевинский А.В., Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Исследование мест возникновения сильных землетрясений Тихоокеанского пояса с помощью алгоритмов распознавания // Известия АН СССР. Серия Физика Земли. 1978. № 9. С. 31–42. EDN: [RZYRZL](#)
- Гвишиани А.Д., Зелевинский А.В., Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Распознавание мест сильнейших землетрясений Тихоокеанского пояса ($M > 8.2$) // Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных. М.: Наука, 1981. С. 30–43. (Вычислительная сейсмология; Вып. 13).
- Schäfer A.M., Wenzel F. Global Megathrust Earthquake Hazard – Maximum Magnitude Assessment Using Multi-Variate Machine Learning // Frontiers in Earth Science. 2019. V. 7. 136. DOI: [10.3389/feart.2019.00136](#) EDN: [HVZQVS](#)
- Schellart W., Rawlinson N. Global correlations between maximum magnitudes of subduction zone interface thrust earthquakes and physical parameters of subduction zones // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2013. V. 225. P. 41–67. DOI: [10.1016/j.pepi.2013.10.001](#)

POTENTIAL LOCATIONS OF THE STRONGEST EARTHQUAKES IN THE PACIFIC OCEAN AND THE SUNDA ARC

Semka M.A., Gorshkov A.I.

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

E-mail: khemul1996@mail.ru

ФОРМАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: НОВЫЙ ПОДХОД И РЕЗУЛЬТАТЫ

Сенцов А.А.¹, Агибалов А.О.^{1,2}

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

E-mail: alekssencov@yandex.ru

(устный доклад)

Оценка сейсмической опасности – один из ключевых вопросов наук о Земле, имеющий несомненное практическое значение. При создании карт общего сейсмического районирования (ОСР) России оценка макросейсмического воздействия выполняется исходя из конфигурации зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ). Однако их выделение во многом основано на экспертной оценке, что, по мнению [Шебакин и др., 2022; 2024], служит одним из факторов, указывающих на необходимость совершенствования методики построения карт ОСР. В нашей работе предложен новый методический подход, направленный на формализацию алгоритма выделения зон ВОЗ. Он основан на использовании морфометрических и тектонофизических данных, обработанных с использованием статистических методов и нечеткой логики, возможности которых востребованы для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений [Гвишиани и др., 2021; Дзедобоев и др., 2019]. В качестве основных исходных данных послужили цифровые модели рельефа, сейсмические каталоги, конфигурация активных разрывных нарушений [Zelenin et al., 2022]. Методика исследований состоит из нескольких этапов.

На первом этапе выполняется расчет морфометрических характеристик рельефа, отражающих интенсивность и направленность неотектонических движений, инициирующих сейсмичность. К таким параметрам относятся математическое ожидание высот, разности базисных поверхностей разного порядка, дисперсия и асимметрия высот, глубина вертикального расчленения, кривизна, взятая по модулю, а также уклон рельефа.

На втором этапе проводится отбор морфометрических параметров, наилучшим образом связанных с локализацией эпицентров землетрясений. Для этого рассчитывается доля эпицентров сейсмических событий, попадающих в области, где значения морфометрических характеристик превышают медиану и верхнюю границу третьего квартиля. Для информативных параметров доля эпицентров землетрясений превышают 0.5 и 0.25 соответственно. Отдельное внимание уделяется высокомагнитудным ($M > 5.5$) событиям. Исходя из рассчитанных значений доли эпицентров землетрясений, выбираются 2–4 самых значимых морфометрических параметра. Они преобразуются линейным алгоритмом в нечеткие множества и обрабатываются γ -оператором [Zimmerman, 1996]. В тех

случаях, когда максимальное значение функции принадлежности достаточно низкое, вместо аппарата нечеткой логики используется метод равнозначных градаций [Копылов, 2019]. Интегральный параметр, определенный одним из упомянутых способов, обозначается как «индекс неотектонической активности» (F).

Третий этап включает расчет относительных величин горизонтальных напряжений (S_h) методом компьютерного геодинамического моделирования, основными исходными данными для проведения которого служат высоты рельефа, конфигурация активных разломов и ориентировки главных нормальных осей напряжений. Последние определяются по решениям фокальных механизмов очагов землетрясений. Предполагается, что под действием внешней нагрузки в упругой модели происходит перераспределение напряжений, обусловленное неоднородностями рельефа и движениями блоков по сетке активных разломов и описываемое законом Кулона – Мора.

На завершающем этапе проводятся границы зон ВОЗ по повышенным значениям двух параметров – F и S_h – таким образом, чтобы контуры этих зон согласовывались с конфигурацией активных разломов. Оценка максимальной магнитуды ожидаемого землетрясения в пределах каждой зоны выполняется на основе эмпирических формул, исходя из протяженности активных разломов.

Информативность предложенной нами методики подтверждена ее апробацией на примере нескольких сейсмоактивных регионов – Большого Кавказа, острова Сахалин [Собисевич и др., 2024; Sobisevich et al., 2024], Горного Алтая и Республики Мьянма.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИФЗ РАН и НИР «Моделирование новейших геодинамических процессов, влияющих на сейсмичность и флюидную проницаемость осадочных толщ» (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Литература

- Гвишиани А.Д., Дзедоев Б.А., Агаян С.М., Белов И.О., Николова Ю.И. Нечеткие множества высокосейсмичных пересечений морфоструктурных линеаментов на Кавказе и в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье // Вулканология и сейсмология. 2021. № 2. С. 3–10. DOI: [10.31857/S0203030621020036](https://doi.org/10.31857/S0203030621020036) EDN: [NOLQFA](https://www.edn.ru/entry/10.31857/S0203030621020036)
- Дзедоев Б.А., Гвишиани А.Д., Белов И.О., Татаринов В.Н., Агаян С.М., Барыкина Ю.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: I. Алтай–Саяны–Прибайкалье. $M \geq 6.0$ // Физика Земли. 2019. № 4. С. 33–47. DOI: [10.31857/S0002-33372019433-47](https://doi.org/10.31857/S0002-33372019433-47) EDN: [AIBRFF](https://www.edn.ru/entry/10.31857/S0002-33372019433-47)
- Копылов И.С. Морфонеотектоническая система оценки геодинамической активности. Пермь, 2019. 132 с. EDN: [EIXXQF](https://www.edn.ru/entry/10.31857/S0002-33372019433-47)
- Собисевич А.Л., Стеблов Г.М., Агibalов А.О., Алешин И.М., Балашов Г.Р., Кондратов А.Д., Макеев В.М., Передерин В.П., Передерин Ф.В., Розенберг Н.К., Сенцов А.А., Холодков К.И., Фадеева К.В. Выделение зон возможных очагов землетрясений в областях новейшего тектогенеза на основе геолого-геоморфологических факторов

и инструментов нечеткой логики (на примере Большого Кавказа) // Вулканология и сейсмология. 2024. № 5. С. 53–66. DOI: [10.31857/S0203030624050049](https://doi.org/10.31857/S0203030624050049) EDN: [HNKINR](https://www.edn.ru/HNKINR)

Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзедоев Б.А., Скоркина А.А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 91–97. DOI: [10.31857/S2686739722601466](https://doi.org/10.31857/S2686739722601466) EDN: [YHXPNN](https://www.edn.ru/YHXPNN)

Шебалин П.Н., Тихоцкий С.А., Коваленко А.А. О совершенствовании подходов к сокращению ущерба от землетрясений // Вестник Российской академии наук. 2024. Т. 94. № 10. С. 886–895. DOI: [10.31857/S0869587324100046](https://doi.org/10.31857/S0869587324100046) EDN: [ESADFW](https://www.edn.ru/ESADFW)

Sobisevich A.L., Steblou G.M., Agibalov A.O., Aleshin I.M., Balashov G.R., Kondratov A.D., Makeev V.M., Perederin V.P., Perederin F.V., Sentsov A.A., Kholodkov K.I. Seismic Domain Identification Algorithm Using Fuzzy Logic Methods With Combined Geological and Geomorphological Data for the Case of Sakhalin Island // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. № 2. P. ES2004. DOI: [10.2205/2024ES000906](https://doi.org/10.2205/2024ES000906) EDN: [JZBFTU](https://www.edn.ru/JZBFTU)

Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data. 2022. V. 14. P. 4489–4503. DOI: [10.5194/essd-14-4489-2022](https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022) EDN: [JDRWYB](https://www.edn.ru/JDRWYB)

Zimmerman H.J. Fuzzy set theory and its applications. Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 1996. 435 p.

FORMALIZATION OF THE METHOD FOR IDENTIFYING OF POTENTIAL EARTHQUAKE FOCI LOCATIONS ZONES: A NEW APPROACH AND RESULTS

Sentsov A.A.¹, Agibalov A.O.^{1,2}

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

² Lomonosov Moscow State University, Moscow

E-mail: alekssencov@yandex.ru

ОЧАГОВЫЕ ФУНКЦИИ И ИХ СПЕКТРЫ ДЛЯ КАМЧАТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ($M = 8.8$)

Скоркина А.А.¹, Молокова А.П.^{1,2}, Чебров Д.В.³, Шубина И.Ю.³

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Физический факультет, г. Москва

³ Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский

E-mail: anna@mitp.ru

(устный доклад)

Полуостров Камчатка вместе с Курильскими островами являются высоко сейсмичным регионом России. Здесь в 2005–2010 гг. была установлена современная сеть цифровых сейсмометрических приборов (в том числе акселерометров) [Чебров и др., 2013; Чебров и др., 2021]. Наличие массива материалов регистрации за несколько лет впервые позволило проводить систематические исследования очагов не только сильных землетрясений, но и часто происходящих здесь слабых и умеренной силы землетрясений, из диапазона $M_w = 3–6$. Так, ранее удалось установить, что в этом магнитудном диапазоне значительно варьируются очаговые спектры ускорений [Skorkina, Gusev, 2017]. В частности, для многих землетрясений с $M > 5$ в районе Авачинского залива наблюдается « $f_{\max}$ очаговой природы» [Gusev, 2013], а именно спад в высокочастотной составляющей очагового спектра ускорений, что важно учитывать при оценках сейсмической опасности.

Камчатское землетрясение 29 июля 2025 г. с $M = 8.8$ стало сильнейшим событием с момента установки сети современных приборов, которые впервые за всю историю инструментальных наблюдений записали такое сильное камчатское землетрясение еще и в ближней зоне (первые километры от области значимых смещений). Анализ акселерограмм с сейсмостанций PET, KRM, NLC, KDT, RUS, PAU, SKR показал, что очаговая функция значительно варьируется с севера на юг.

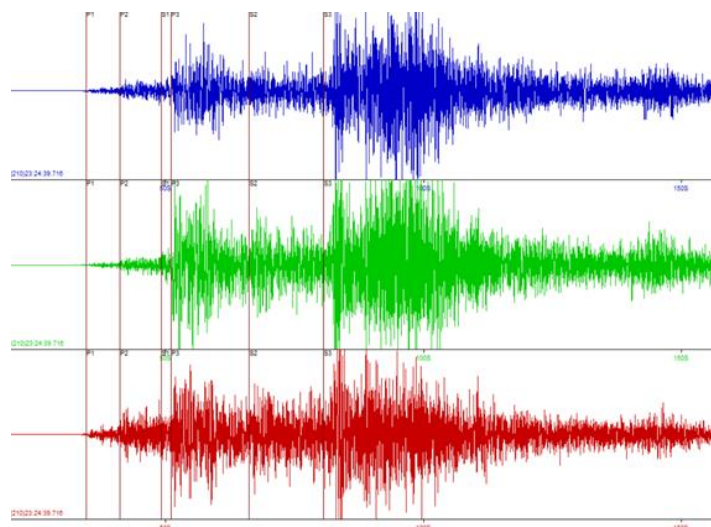


Рис. Двухминутный фрагмент акселерограмм сейсмостанции «Русская» (RUS) для камчатского землетрясения ($M = 8.8$). Шкала ординат – условная. Прямыми выделены три пары вступлений (P, S) для подсобытий камчатского землетрясения

Так, например, для сейсмической станции «Русская» (RUS) характерны группы вступлений разной полярности (см. рис.), много больше двух (продольного и поперечного, характерных для классического землетрясения), что позволяет предполагать наличие связанных подсобытий, которые суммарно вызвали эффект $M = 8.8$.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПЗ РАН.

Литература

- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Яцук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40. DOI: [10.7868/S0203030613010021](https://doi.org/10.7868/S0203030613010021) EDN: [PUASZB](https://www.edn.ru/PUASZB)
- Чебров Д.В., Тихонов С.А., Дроздин Д.В., Дроздина С.Я., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Салтыков В.А., Сеньюков С.Л., Серафимова Ю.К., Сергеев В.А., Яцук В.В. Система сейсмического мониторинга и прогнозирования на Камчатке и её развитие. Основные результаты наблюдений в 2016–2020 гг. // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 3. С. 28–49. DOI: [10.35540/2686-7907.2021.3.02](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.02) EDN: [RUYRWU](https://www.edn.ru/RUYRWU)
- Gusev A.A. High-frequency radiation from an earthquake fault: a review and a hypothesis of fractal rupture front geometry // Pure and Applied Geophysics. 2013. V. 170. № 1. P. 65–93. DOI: [10.1007/s00024-012-0455-y](https://doi.org/10.1007/s00024-012-0455-y) EDN: [REVJWL](https://www.edn.ru/REVJWL)
- Skorkina A.A., Gusev A.A. Determination of corner frequencies of source spectra for subduction earthquakes in Avacha Gulf (Kamchatka) // Russian Geology and Geophysics. 2017. V. 58. № 7. P. 844–854. DOI: [10.1016/j.rgg.2017.06.007](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.06.007) EDN: [XNSJBT](https://www.edn.ru/XNSJBT)

SOURCE FUNCTIONS AND THEIR SPECTRA FOR KAMCHATKA EARTHQUAKE WITH $M = 8.8$

Skorkina A.A.¹, Molokova A.P.^{1,2}, Chebrov D.V.³, Shubina I.Yu.³

¹ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow

³ Kamchatka Branch of the Geophysical Survey, RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky

E-mail: anna@mitp.ru

О СВЯЗИ НАКЛОНА ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ И ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ В ПРОСТРАНСТВАХ РАЗНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПО ДАННЫМ КОМПЬЮТЕРНОГО И ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Смирнов В.Б.^{1,2,3}, Черепанцев А.С.^{3,4}, Пономарев А.В.², Патонин А.В.^{2,5}

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Физический факультет, г. Москва*

² *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

³ *Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский*

⁴ *Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону*

⁵ *Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, п. Борок*

E-mail: vs60@mail.ru

(устный доклад)

Проблема связи параметра Гутенберга – Рихтера и фрактальной размерности множества гипоцентров землетрясений имеет давнюю историю как в части статистических исследований сейсмичности, так и в развитии теоретических гипотез. Вопрос о связи этих параметров актуален для широкого круга задач сейсмологии и физики сейсмического режима, в частности задач разработки физически обоснованных методов оценки сейсмической опасности, развития физических основ мониторинга сейсмического режима и прогноза землетрясений. В настоящей работе проведено исследование взаимосвязи параметров Гутенберга – Рихтера и фрактальной размерности на основе компьютерной модели сейсмического процесса (клеточного автомата Олами – Федера – Кристенсена) в пространствах (на сетках) разной размерности. Результаты компьютерного моделирования сопоставлены с полученными ранее данными лабораторного моделирования сейсмичности при разрушении образцов горных пород. Компьютерное моделирование в пространствах различной размерности показало, что параметр Гутенберга – Рихтера и фрактальная размерность множества событий зависят от размерности пространства, в котором развивается разрушение, увеличиваясь с увеличением размерности. В пространствах различной размерности накопленная упругая энергия высвобождается при образовании разрыва среды из областей различной размерности. В случае трехмерного пространства – из области определенного объема, в случае двумерного пространства – из области определенной площади. При том же размере разрыва и той же критической плотности упругой энергии в трехмерном (объемном) случае, вероятно, высвобождается больше энергии, чем в двумерном (площадном). Можно предположить, что с этим связано различие показателей энергетического спектра и фрактальной геометрии процесса разрушения в пространствах разной размерности. Результаты компьютерного и лабораторного моделирования сейсмичности подтвердили также справедливость формулы Аки (прямой пропорциональности параметра Гутенберга – Рихтера и фрактальной размерности).

Обоснование выполнения формулы Аки при разрушении в пространствах различной размерности может оказаться полезным для развития методов более осмысленного и эффективного перехода от сейсмической статистики к оценкам физических параметров процесса разрушения в областях с различными типами разрушения в различных тектонических условиях.

Работа выполнена в рамках госзадания Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН №075-00604-25 (Межведомственная комплексная программа научных исследований Камчатского полуострова и сопредельных акваторий) в части компьютерного моделирования процесса разрушения и обоснования выполнения формулы Аки при разрушении в пространствах различной размерности и госзадания ИФЗ РАН в части лабораторной верификации результатов моделирования.

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE GUTENBERG–RICHTER B-VALUE AND THE FRACTAL DIMENSION OF SEISMICITY IN SPACES OF DIFFERENT DIMENSIONS ACCORDING TO COMPUTER AND LABORATORY MODELING

Smirnov V.B.^{1,2,3}, Cherepantsev A.S.^{2,4}, Ponomarev A.V.², Patonin A.V.^{2,5}

¹ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow*

² *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow*

³ *Kamchatka Branch, Geophysical Survey, RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky*

⁴ *Southern Federal University, Rostov-on-Don*

⁵ *Geophysical Observatory “Borok”, IPE RAS, Borok*

E-mail: vs60@mail.ru

СЕЙСМОФОТОНИКА: ПАССИВНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ДИСПЕРСИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ DAS «ДУНАЙ»

Спиридонов Е.П.¹, Кислов К.В.², Харасов Д.Р.¹, Старовойт Ю.О.¹, Трещиков В.Н.¹

¹ ООО «Т8», г. Москва

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

E-mail: spiridonov@t8.ru

(устный доклад)

Распределённое акустическое зондирование (Distributed Acoustic Sensing, DAS) за последние годы стало одним из ключевых направлений в развитии технологий мониторинга земной поверхности и инфраструктуры. DAS уже доказало свою эффективность в активных сейсморазведочных экспериментах, однако наибольший потенциал этой технологии раскрывается именно при пассивном анализе фонового сейсмического поля – **шумовой томографии** [Miao et al., 2025; Ehsaninezhad et al., 2024], когда информация о структуре среды извлекается без применения искусственных источников возбуждения сейсмического сигнала.

Пассивные измерения позволяют непрерывно регистрировать деформации в природных и техногенных объектах, что делает возможным **долговременный мониторинг окружающей среды в режиме 24/7**. Такой подход обеспечивает:

- **существенное снижение эксплуатационных затрат;**
- **повышение безопасности и экологичности** наблюдений;
- **возможность мониторинга труднодоступных или опасных районов**, включая ледовые и водные поверхности, где установка классических сейсмометров затруднена;
- **высокую пространственную дискретизацию**, обеспечивающую чувствительность к локальным изменениям в структуре грунта, льда или инженерных конструкций;
- **гибкость во времени и масштабе**, позволяющую анализировать процессы от микросекундных колебаний до сезонных изменений состояния среды.

В рамках представленной работы проводится исследование методов пассивной сейсморазведки с использованием **отечественной DAS-системы «Дунай»** производства компании Т8. Эксперимент выполнен на льду Клязьминского водохранилища, где система регистрировала микросейсмические колебания без применения активных источников [Спиридонов и др., 2025]. Цель эксперимента – разработка технологического и программного прототипа, способного выполнять **непрерывный мониторинг состояния природных объектов и инфраструктуры** в реальном времени.

Основное внимание уделяется построению **алгоритмического графа обработки данных** – от предварительной фильтрации и оценки когерентности до формирования кросс-корреляционных матриц и извлечения дисперсионных характеристик поверхностных волн.

Поскольку условия эксперимента (лед, температурные градиенты, слабые сигналы) предъявляют особые требования к устойчивости методов, важнейшей задачей стала разработка системы **контроля качества и метрик достоверности данных (КК)**, влияющих на ресурсоемкость, точность и надежность обработки.

Предварительные результаты показали, что даже при низком уровне фонового шума и ограниченном числе каналов (24 канала с шагом 5 м, длительность записи 1 час, частота дискретизации 2 кГц) возможно получение устойчивых корреляционных связей и реконструкция частотно-скоростных зависимостей, соответствующих дисперсии поверхностных волн. Эти результаты подтверждают **перспективность пассивного DAS-мониторинга** как эффективного инструмента для изучения ледовых, грунтовых и гидрологических систем.

Этапы обработки данных DAS, отражающие текущее состояние методики и служащие основой для дальнейшей адаптации под различные типы природных и техногенных условий, представлены в таблице. Такая методика открывает перспективы для создания отечественных интеллектуальных систем экологического и геофизического мониторинга нового поколения.

Таблица. Этапы пассивного дисперсионного анализа данных DAS

№ Этап	Описание	Ключевые параметры	Выход
1 Сырые данные DAS	Волоконно-оптические измерения скорости деформации, содержащие фоновый сейсмический шум	Длительность записи $T \approx 1$ ч, пространственная выборка $\Delta \approx 1.6$ м, частота зондирования $f_s = 2$ кГц	Непрерывная запись $\epsilon(t, x)$
2 Выделение сейсмограмм деформации	Интегрирование по времени, привязка оптической длины L_{opt} к геометрической L_{geom} , усреднение по длине колец L_{loop}	$L_{opt} \approx 360$ м, расстояние между кольцами $\Delta x = 5$ м, $L_{geom} \approx 115$ м, $L_{loop} \approx 10$ м, $N = 24$ трассы	Непрерывная запись i -ой трассы $u_i(t)$
3 Предобработка и фильтрация	Удаление тренда, нормализация амплитуд, децимация, полосовая фильтрация	Полоса: 0.1–10 Гц, децимация до 50 Гц	Отфильтрованные трассы $\tilde{u}_i(t)$
4 Вычисление функций взаимной корреляции (ВКФ)	Разбиение на окна длиной T_w , корреляция всех пар каналов, суммирование по времени	$T_w = 60$ с, перекрытие 0%, $C_{ij}(\tau) = \int u_i(t)u_j(t+\tau)dt$	Набор ВКФ для всех пар (i, j)
5 Контроль качества (КК) ВКФ	Автоматическая оценка: ОСШ, пик/огibaющая, правдоподобие	Например, ОСШ ≥ 3 , пик/огиб. ≥ 4 , правдоподобие ≥ 0.3	Маска качественных ВКФ
6 Формирование диаграммы направленности	Группировка соседних каналов, усреднение ВКФ внутри и между лучами	Ширина луча: 9 кан. (45 м), шаг: 2 кан. (10 м), $N_b \approx 8$ лучей	Лучевые ВКФ с повышенным ОСШ
7 Обработка массивом	Поиск по сетке медленностей источника p_s и приемника p_r : slant-stack, f-k анализ, диаграммы направленности	Диапазон скоростей: 0.5–200 м/с, разрешение по p : 0.005 с/м	Карты энергии /когерентности (f, v) или (f, p_s, p_r)
8 Выделение дисперсионных кривых	Трассировка гребней максимальной энергии, преобразование $v = 1/p$	Ограничения непрерывности, многомодовое выделение	Дисперсионные кривые $v(f)$
9 Результаты и валидация	Сравнение методов, сглаживание, проверка на физическую адекватность	Сравнение с теорией изгибных волн, экспорт для инверсии	Финальные кривые $v(f)$, отчёты КК

Литература

- Спиридонов Е.П., Преснов Д.А., Белов М.В., Бенгальский Д.М., Ашкар Г.Х., Костенко М.В., Харасов Д.Р., Никитин С.П., Наний О.Е., Кислов К.В., Гравиров В.В., Старовойт Ю.О., Трещиков В.Н. Мониторинг ледового покрова сейсмическими методами с использованием распределенного акустического зондирования // Труды Десятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский. 28 сентября – 04 октября 2025 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2025. С. 308–312. <https://emsd.ru/files/conf2025/collection2025.pdf>
- Ehsaninezhad L., Wollin C., Rodríguez Tribaldos V., Schwarz B., Krawczyk C.M. Urban subsurface exploration improved by denoising of virtual shot gathers from distributed acoustic sensing ambient noise // *Geophysical Journal International*. 2024. V. 237. P. 1751–1764. DOI: [10.1093/gji/ggae134](https://doi.org/10.1093/gji/ggae134) EDN: [NJAIOX](https://doi.org/10.1093/gji/ggae134)
- Miao Y., Rabade S., Liu M., Spica Z.J. Evaluating subsurface imaging performance with ocean-bottom distributed acoustic sensing and double beamforming // *Geophysical Journal International*. 2025. V. 242. ggaf190. DOI: [10.1093/gji/ggaf190](https://doi.org/10.1093/gji/ggaf190)

SEISMOPHOTONICS: PASSIVE MEASUREMENT OF SURFACE WAVE DISPERSION USING THE DUNAY DAS

Spiridonov E.P.¹, Kislov K.V.², Kharasov D.R.¹, Starovoit Yu.O.¹, Treshchikov V.N.¹

¹ LLC T8, Moscow

² Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

E-mail: spiridonov@t8.ru

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА. СРАВНЕНИЕ ДП ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДВУХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ: КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКИЙ И СЕВЕРНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ

Сычева Н.А.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

E-mail: ivtran@mail.ru

(стендовый доклад)

Для Крымско-Черноморского региона из различных источников по очаговым параметрам собраны сведения о динамических параметрах (ДП) 264 землетрясений с $K_{\Pi} = 5.2\text{--}13.1$ (K_{Π} – класс землетрясения по Пустовитенко и Кульчицкому), которые произошли с 1990 по 2022 г.: скалярный сейсмический момент M_0 , радиус очага r и сброс касательных напряжений $\Delta\sigma$ (далее – сброс напряжений) и др. Для этих событий анализируются взаимосвязи этих параметров с сейсмическим моментом и магнитудой. Построены распределения динамических параметров от магнитуды или скалярного сейсмического момента, рассчитаны коэффициенты корреляции. Проведено сопоставление динамических параметров двух сейсмоактивных регионов: Крымско-Черноморский регион и Северный Тянь-Шань (Бишкекский геодинамический полигон). По Северному Тянь-Шаню значения динамических параметров очагов для 187 землетрясений (1998–2017 гг.) разных энергетических классов ($K = 8.7\text{--}14.8$) были получены в работе Богомолова Л.М. и Сычевой Н.А. [Сычева, Богомолов, 2020]. Для рассматриваемых регионов при расчете динамических параметров использовалась модель Брюна, и рассматривались слабые землетрясения и события умеренной силы. Совместное рассмотрение распределений рассматриваемых ДП от магнитуды и скалярного сейсмического момента показало, что они имеют идентичный характер и близкие граничные значения. Для Крымско-Черноморского региона зависимость логарифма скалярного сейсмического момента имеет вид: $\lg M_0 = 0.87M + 11.4$, для Северного Тянь-Шаня – $\lg M_0 = 1.14M + 9.4$. Наиболее высокие коэффициенты корреляции между ДП и скалярным сейсмическим моментом получены для Северного Тянь-Шаня.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (FMWU-2025-0036).

Литература

Сычева Н.А., Богомолов Л.М. О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии // Геосистемы переходных зон. 2020. Т. 4. № 4. С. 393–416. DOI: [10.30730/gtr.2020.4.4.393-416](https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416) EDN: [CQEEFM](https://www.edn.ru/entry/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416)

DYNAMIC PARAMETERS OF EARTHQUAKES IN THE CRIMEAN-BLACK SEA REGION. COMPARISON OF EARTHQUAKE DYNAMICS IN TWO SEISMICALLY ACTIVE REGIONS: THE CRIMEAN-BLACK SEA AND NORTHERN TIEN SHAN

Sycheva N.A.

Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

E-mail: ivtran@mail.ru

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СБРОШЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В АЛТАЕ-САЯНСКОМ СЕЙСМОАКТИВНОМ РЕГИОНЕ

Сычева Н.А.¹, Богомолов Л.М.²

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

² *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск*

E-mail: ivtran@mail.ru

(устный доклад)

Для Алтае-Саянского сейсмоактивного региона сформирован банк данных по тензорам сейсмического момента землетрясений, произошедших в 1978–2025 гг. Для этих событий скалярный сейсмический момент M_0 уже известен по СМТ-каталогу. В данной работе проведены оценки таких динамических параметров, как радиус очага r , сброс касательных напряжений $\Delta\sigma$, приведенной сейсмической энергии e_{PR} с использованием феноменологического подхода, основанного на ранее полученных регрессионных соотношениях между радиусом очага и скалярным сейсмическим моментом M_0 . Получены оценки сброшенных напряжений и приведенной сейсмической энергии для 69 землетрясений с магнитудой M_W от 3.5 до 7.2. Тем самым существенно расширен банк данных по этим параметрам землетрясений Алтае-Саянского сейсмоактивного региона. Построены карты распределения по площади усредненных значений сброшенных напряжений и приведенной сейсмической энергии.

Исследования проведены в рамках госзадания Института физики Земли РАН и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

DISTRIBUTION OF DISCHARGED STRESSES IN THE ALTAI-SAYAN SEISMICALLY ACTIVE REGION

Sycheva N.A.¹, Bogomolov L.M.²

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow*

² *Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk*

E-mail: ivtran@mail.ru

АДВЕКЦИЯ СКАЛЯРНОЙ ПРИМЕСИ ДВУМЕРНЫМ ТЕЧЕНИЕМ С ПРОСТРАНСТВЕННО КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИМ ПОЛЕМ СКОРОСТИ

Таранюк А.А.

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

E-mail: taranyuk.anton@gmail.com

(устный доклад)

В данной работе численно исследованы спектральные задачи для оператора адвекции скалярной примеси [Biferale, 1995] квазипериодическими полями скорости, характерными для астрофизических и геофизических приложений, при наличии диффузии. Цель работы – численное определение доминирующего (т.е. имеющего максимальную действительную часть) собственного значения оператора

$$A[c] = k\Delta c - (\mathbf{u} \cdot \nabla)c,$$

которое определяет динамику затухания или роста скалярного поля c в турбулентной среде.

Для решения спектральной задачи применён псевдоспектральный метод [Canuto et al., 1987; Peyret, 2002] с разложением полей в ряды Фурье и метод контурного интегрирования резольвенты [Вишик, 1986], по-видимому, впервые примененный нами для численного решения спектральных задач для эллиптического оператора. Это позволило локализовать собственные значения, проверить их наличие внутри заданных контуров в комплексной плоскости и вычислить их. Решение вспомогательных линейных систем выполнялось с использованием стабилизированного метода бисопряжённых градиентов BiCGSTAB [van der Vorst, 1992; Sleijpen, van Gijzen, 2010].

Изучено влияние степени квазипериодичности (параметр α) двумерного течения с полем скорости $\mathbf{u}$, задаваемым в виде суммы двух соленоидальных периодических полей $\mathbf{v}$ и $\mathbf{w}$ с несоизмеримыми пространственными периодами (L_{v_1}, L_{v_2}) и (L_{w_1}, L_{w_2}) соответственно:

$$\mathbf{u} = \alpha \mathbf{v} + (1 - \alpha) \mathbf{w}, \quad \nabla \mathbf{u} = 0,$$

на доминирующее собственное значение $\lambda_{\max}$. При $\alpha = 0$ или $\alpha = 1$ предельные режимы чисто периодические. Показано, что для рассмотренных полей $\mathbf{u}$ квазипериодичность поля скорости при $0 < \alpha < 1$ около середины этого интервала приводит к существенному снижению затухания доминирующей моды (см. рис.) по сравнению с чисто периодическими полями, что можно интерпретировать как усиление эффективности перемешивания скалярного поля.

Полученные результаты указывают на применимость предложенного алгоритма для анализа задач кинематического динамо в квазипериодических полях течений электропроводной жидкости.

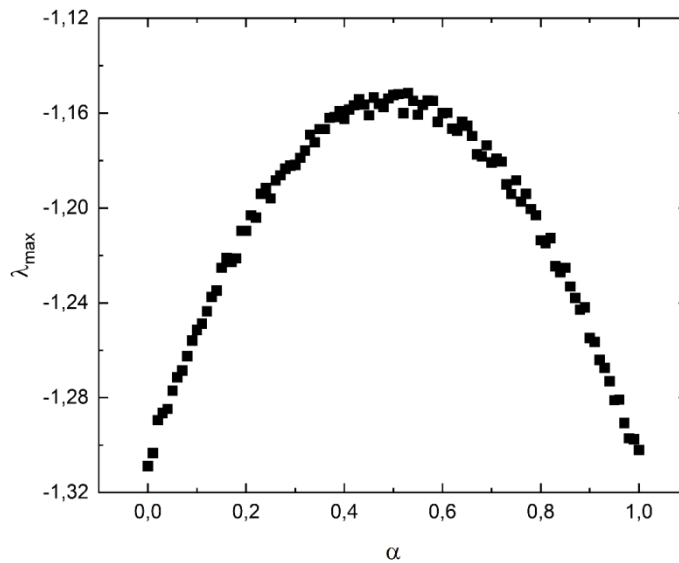


Рис. График зависимости доминирующего собственного значения $\lambda_{\max}$ от параметра степени квазипериодичности α

Литература

- Вишик М.М. Периодическое динамо // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. М.: Наука, 1986. С. 186–215. (Вычислительная сейсмология; вып. 19).
- Biferale L., Crisanti A., Vergassola M., Vulpiani A. Eddy viscosity in scalar transport // Physics of Fluids. 1995. V. 7. № 11. P. 2725–2734. DOI: [10.1063/1.868651](https://doi.org/10.1063/1.868651) EDN: [XXYPNM](https://www.edn.net/XXYPNM)
- Canuto C., Hussaini M.Y., Quarteroni A., Zang T.A. Spectral Methods in Fluid Dynamics. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1987. 557 pp. (Springer Series in Computational Physics). DOI: [10.1007/978-3-642-84108-8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-84108-8)
- Peyret R. Spectral Methods for Incompressible Viscous Flow. NY: Springer, 2002. 434 pp. (Applied Mathematical Sciences; V. 148). DOI: [10.1007/978-1-4757-6557-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6557-1)
- Sleijpen G.L.G., van Gijzen M.B. Exploiting BiCGstab(l) strategies to induce dimension reduction // SIAM Journal on Scientific Computing. 2010. V. 32. № 5. P. 2687–2709. DOI: [10.1137/090752341](https://doi.org/10.1137/090752341)
- van der Vorst H.A. Bi-CGSTAB: A fast and smoothly converging variant of Bi-CG for the solution of nonsymmetric linear systems // SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing. 1992. V. 13. № 2. P. 631–644. DOI: [10.1137/0913035](https://doi.org/10.1137/0913035)

ADVECTION OF A SCALAR IMPURITY BY A TWO-DIMENSIONAL FLOW WITH A SPATIALLY QUASI-PERIODIC VELOCITY FIELD

Taranyuk A.A.

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

E-mail: taranyuk.anton@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ДИНАМО ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ ЖИДКОСТИ С НАКЛОННОЙ ОСЬЮ

Толмачев Д.С.

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

E-mail: tolmachev@mitp.ru

(устный доклад)

Выявление предвестников инверсий геомагнитного поля важно как в связи с их возможными негативными последствиями для человечества, так и для понимания динамики земного ядра. В предыдущей работе [Tolmachev et al., 2024] показано, что отдельные коэффициенты спектрального разложения решения задачи о конвективном динамо с простыми граничными условиями содержат признаки приближения инверсии. Анализ этих коэффициентов позволяет выявлять изменения амплитуды и знака гармоник магнитного поля, предшествующие смене полярности. Вместе с тем, упрощённые граничные условия и идеализированная постановка ограничивают физическую достоверность результатов, что делает необходимым дальнейшее уточнение модели для более надёжного выявления предвестников. Этот вывод согласуется с общими наблюдениями по анализу предвестников и уменьшения диполя в других моделях [Olson et al., 2009], а также с результатами классических трёхмерных расчетов инверсий [Glatzmaier, Roberts, 1995], где физические детали и граничные условия сильно влияют на динамику магнитного поля.

Методы машинного обучения (ML) предлагают перспективное дополнение к спектральному анализу. В работе [Gwirtz et al., 2022] ML применяется к временным рядам осевого диполя из расчетов сферических динамо и палеомагнитных реконструкций, позволяя выявлять сложные нелинейные закономерности, предшествующие инверсиям. Однако эффективность ML зависит от структуры данных и их физической достоверности, а также от количества доступных инверсий. Эти ограничения согласуются с обзорами палеомагнитных особенностей и различий в моделях [Valet et al., 2012], что подчёркивает необходимость создания надёжной модели для генерации обучающих данных.

В настоящей работе используется модель численного решения полной системы уравнений магнитогидродинамики для горизонтального слоя электропроводной жидкости с тепловой конвекцией, вращающегося относительно наклонной оси [Tolmachev et al., 2023]. Процесс описывается уравнением движения с учётом сил Архимеда, Кориолиса и Лоренца, уравнением теплопроводности для описания распределения температуры и уравнением магнитной индукции для эволюции магнитного поля. Особенностью моего подхода являются граничные условия: жёсткие и свободные границы для скорости, проводящие и изолирующие условия для магнитного поля. Для интегрирования системы коэффициентов

спектрального разложения применён полунявный метод Рунге – Кутты, поскольку предыдущий экспоненциальный метод не был достаточно эффективен для рассматриваемой системы.

Такой подход позволяет генерировать большой объём физически достоверных данных с сериями инверсий и их предвестниками, создавая основу для обучения ML-алгоритмов и анализа устойчивости предвестников к изменениям граничных условий и параметров модели.

Литература

- Glatzmaier G.A., Roberts P.H. A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal // *Nature*. 1995. V. 377. P. 203–209. DOI: [10.1038/377203a0](https://doi.org/10.1038/377203a0) EDN: [XXOGJZ](https://www.edn.ru/xxogjz)
- Gwirtz K., Davis T., Morzfeld M., Constable C., Fournier A., Hulot G. Can machine learning reveal precursors of reversals of the geomagnetic axial dipole field? // *Geophysical Journal International*. 2022. V. 231. № 1. P. 520–535. DOI: [10.1093/gji/ggac195](https://doi.org/10.1093/gji/ggac195) EDN: [BXDPKK](https://www.edn.ru/bxdpkk)
- Olson P., Driscoll P., Amit H. Dipole collapse and reversal precursors in a numerical dynamo // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2009. V. 173. P. 121–140. DOI: [10.1016/j.pepi.2008.11.010](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.11.010)
- 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. № 4. P. 808. DOI: [10.3390/math11040808](https://doi.org/10.3390/math11040808) EDN: [CMTJBF](https://www.edn.ru/cmtjbf)
- Tolmachev D., Chertovskih R., Jeyabalan S.R., Zheligovsky V. Predictability of Magnetic Field Reversals // *Mathematics*. 2024. V. 12. № 3. P. 490. DOI: [10.3390/math12030490](https://doi.org/10.3390/math12030490) EDN: [VDFWOK](https://www.edn.ru/vdfwok)
- Valet J.P., Fournier A., Courtillot V., Herrero-Bervera E. Dynamical similarity of geomagnetic field reversals // *Nature*. 2012. V. 490. P. 89–93. DOI: [10.1038/nature11491](https://doi.org/10.1038/nature11491) EDN: [RNLSXF](https://www.edn.ru/rnlsxf)

NUMERICAL SIMULATION OF MAGNETIC DYNAMO IN A ROTATING CONDUCTING FLUID WITH AN INCLINED AXIS

Tolmachev D.S.

Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS, Moscow

E-mail: tolmachev@mitp.ru

ЛАБОРАТОРНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ ЗАКАЧКЕ ЖИДКОСТИ

Турунтаев С.Б.^{1,3}, Рига В.Ю.^{1,2}, Зенченко Е.В.¹

¹ Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского, г. Москва

² Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова, г. Москва

³ Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

E-mail: stur@idg.ras.ru

(устный доклад)

В ходе разработки месторождений углеводородов, использования геотермальных источников энергии, при захоронении опасных отходов и парниковых газов происходит изменение порового давления и вещественного состава подземных флюидов. Наиболее ярко реакция подземных флюидных систем на воздействие проявляется в росте сейсмической активности, в сильных и даже катастрофических землетрясениях. О серьезности проблемы можно судить на основании [Rubinstein, Mahani, 2015], где показано, что в США в последние десятилетия уровень сейсмичности возрос многократно в связи с воздействием на подземные флюиды.

Исследованию проблемы индуцированной сейсмичности посвящено множество исследований, которые можно условно разделить на три группы: анализ случаев индуцированной сейсмичности, построение физико-математических моделей возникновения сейсмических событий при изменении порового давления, лабораторное моделирование. В конечном итоге теоретические модели должны уточняться по данным лабораторного моделирования и использоваться для объяснения и прогнозирования сейсмических явлений, происходящих при воздействии на подземные флюидные системы.

В представляемом докладе рассматриваются подходы к построению теоретических моделей и возможности лабораторных экспериментов. Реализована модель развития сейсмогенерирующей подвижки по разлому в проницаемых породах при закачке жидкости в скважину, находящуюся на некотором расстоянии от разлома. Трение на разломе задается двухпараметрическим законом типа rate-state. В результате проведенных расчетов удалось оценить параметры, которые определяют переход от асейсмического скольжения берегов разлома к сейсмогенерирующему под действием закачки флюида: скорость изменения давления, критическая жесткость и степень разупрочнения разлома при движении. При наличии на разломе включений в виде областей с упрочнением переход разлома к сейсмогенерирующему скольжению происходит при меньших значениях критической длины, определяемой нарушением критерия Кулона. Показано, что такие включения, даже небольшого размера, изолируют остальную область разлома, приводя к остановке

сейсмического проскальзывания. При этом могут возникать сейсмические подвижки в других областях разлома с задержкой по времени от сотен секунд до дней, в зависимости от параметров закона трения rate-state.

В лабораторных экспериментах исследовалось влияние заранее созданных неоднородностей (в виде трещин или включений) на распространение порового давления при закачке жидкости и на возникающую акустическую эмиссию (аналог сейсмических событий). Получено, что наличие заранее созданной трещины приводит к отклонению распространения порового давления от изотропности. Определено раскрытие «естественной» трещины при пересечении ее трещиной гидроразрыва. Установлено, что импульсы акустической эмиссии в неоднородном материале имеют более широкий частотный диапазон по сравнению с однородным материалом. Полученные экспериментальные результаты будут использованы для уточнения модели развития сейсмогенерирующей подвижки при закачке жидкости.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИДГ РАН FMWN-2025-0007.

Литература

Rubinstein J.L., Mahani A.B. Myths and facts on wastewater injection, hydraulic fracturing, enhanced oil recovery, and induced seismicity // *Seismological Research Letters*. 2015. V. 86. P. 1060–1067. DOI: [10.1785/0220150067](https://doi.org/10.1785/0220150067)

LABORATORY AND NUMERICAL SIMULATIONS OF SEISMICITY INDUCED BY FLUID INJECTIONS

Turuntaev S.B.^{1,3}, Riga V.Yu.^{1,2}, Zenchenko E.V.¹

¹ *Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, RAS, Moscow*

² *Dukhov Automatics Research Institute, Moscow*

³ *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny*

E-mail: stur@idg.ras.ru

АДАПТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ВИБРАЦИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ТЕМНЫЕ ВОЛОКНА

Ушаков Н.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург

E-mail: n.ushakoff@spbstu.ru

(устный доклад)

Распределенные волоконно-оптические датчики (ВОД) представляют интерес для геофизических исследований, задач нефтегазового сектора, мониторинга состояния сложных сооружений и ряда других научных и практических задач [Gorshkov *et al.*, 2022]. Одним из основных преимуществ является возможность одновременной регистрации вибраций в точках пространства, распределенных в пространстве на расстояния в десятки километров друг от друга, при том, что чувствительное оптическое волокно одновременно и служит чувствительным элементом, и используется для сбора сигналов датчиков. При мониторинге слабых сейсмических сигналов применение распределенных ВОД позволяет многократно улучшить отношение сигнал-шум (ОСШ) за счет обработки сигналов с использованием принципов формирования диаграммы направленности для антенных решеток. Крайне привлекательным для задач распределенной сенсорики выглядит использование так называемых темных волокон благодаря отсутствию затрат на прокладку чувствительного кабеля [Biondi *et al.*, 2022]. Однако основным назначением темных волокон является оптическая связь, из-за чего их чувствительность, уровень шумов, а также скорость распространения акустических волн в окружающей среде могут иметь неравномерные пространственные распределения, кроме того, форма прокладки кабеля, как правило, отличается от линейной. Помимо этого, затруднять автоматизированную обработку сигналов могут характерные для распределенных ВОД проблемы, такие как замирания в отдельных пространственных точках и нелинейность отклика. Цель доклада – привлечь внимание к данным нюансам и предложить ряд решений.

В традиционных методах формирования диаграмм направленности антенных решеток предполагается применение аподизации для снижения уровня боковых лепестков итоговой диаграммы направленности. При этом предполагается, что отдельные элементы антенной решетки имеют одинаковые чувствительности. Для калибровки чувствительности предлагается введение ряда вспомогательных оценок характеристик сигналов отдельных каналов распределенного ВОД, таких как форма спектра и уровень зарегистрированных сенсором флуктуаций. Также для точного формирования диаграммы направленности необходима точная информация о пространственном распределении фазовых задержек

регистрируемой акустической волны. Данную проблему затруднительно полностью решить простой калибровкой из-за зависимости акустических свойств грунтов от температуры и влажности окружающей среды. Проанализирована возможность оценки фактических фазовых задержек акустических волн из сигналов распределенных ВОД до формирования диаграммы направленности. Для оценки фазовых задержек акустической волны применены как классические методы обработки сигналов (корреляционный анализ, Фурье-анализ), так и более сложные (вейвлет-разложение, применение параметрических оценок, анализ сингулярного спектра). Рассмотрено влияние возможной нелинейности отклика распределенного ВОД [Hartog *et al.*, 2018] на точность оценки фазовых задержек акустической волны.

Указанные выше проблемы обработки сигналов распределенных ВОД рассмотрены на примере результатов моделирования отклика распределенного ВОД на внешнюю сейсмическую волну, а также на примере анализа отдельных файлов из датасета Global DAS monitoring 2023.

Из полученных результатов можно сделать вывод о необходимости учета специфики отклика распределенных ВОД вибраций на внешние волновые воздействия и возможности улучшения ОСШ сигналов после адаптивного формирования диаграммы направленности в несколько раз по сравнению со стандартным диаграммоформированием.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-10095, <https://rscf.ru/project/23-72-10095/>.

Литература

- Biondi B.L., Yuan S., Martin E.R., Huot F., Clapp R.G.* Using Telecommunication Fiber Infrastructure for Earthquake Monitoring and Near-Surface Characterization // Distributed Acoustic Sensing in Geophysics: Methods and Applications. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2022. P. 131–148. DOI: [10.1002/9781119521808.ch10](https://doi.org/10.1002/9781119521808.ch10)
- Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., et al.* Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective // Sensors. 2022. V. 22. № 3. DOI: [10.3390/s22031033](https://doi.org/10.3390/s22031033). DOI: [10.3390/s22031033](https://doi.org/10.3390/s22031033) EDN: [JLRFPG](https://www.edn.net/JLRFPG)
- Hartog A.H., Liokumovich L.B., Ushakov N.A. et al.* The use of multi-frequency acquisition to significantly improve the quality of fibre-optic-distributed vibration sensing // Geophysical Prospecting. 2018. V. 66. P. 192–202. DOI: [10.1111/1365-2478.12612](https://doi.org/10.1111/1365-2478.12612) EDN: [UXQLKL](https://www.edn.net/UXQLKL)

ADAPTIVE BEAMFORMING IN FIBER-OPTIC DISTRIBUTED VIBRATION SENSORS IN CASE OF THE USE OF DARK FIBERS

Ushakov N.A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

E-mail: n.ushakoff@spbstu.ru

ВОЗНИКНОВЕНИЕ УДАЛЕННЫХ АФТЕРШОКОВ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

Федорова М.Г., Крушельницкий К.В.

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

Email: mfedorova356@gmail.com

(стендовый доклад)

В настоящей работе анализируется явление увеличения радиуса корреляции перед сильными землетрясениями путем построения алгоритма прогноза, в котором предвестником сильных землетрясений является локальное увеличение числа удаленных афтершоков. Подобный анализ проводился в работе [Prozorov, Schreider, 1990], где авторы в качестве предвестников использовали афтершоки сильных и средней силы землетрясений, находящиеся на относительно большом расстоянии и близко по времени.

Выделение афтершоков в [Prozorov, Schreider, 1990] проводилось в фиксированном прямоугольном пространственно-временном окне. В нашей работе выделение афтершоков проводится методом [Zaliapin, Ben-Zion, 2013], в рамках которого для каждой пары событий подсчитывается величина функции близости, учитывающая близость событий в пространстве-времени-магнитуде.

Удаленными афтершоками мы называем те афтершоки, которые удалены от основного толчка на расстояние, в n раз превышающее размер очага основного толчка, рассчитанного по формуле $L = 10^{-2.49+0.57M}$ [Wells, Coppersmith, 1994], где M – магнитуда основного толчка. Производится поиск групп пар основной толчок – удаленный афтершок. Для их группировки между парами рассчитывается величина $z = \sqrt{r^2 + (ct)^2}$, где r – расстояние в километрах между центрами отрезков, соединяющих основной толчок и афтершок в каждой паре, t – время между парами в сутках, $c = 1$ км/сут – коэффициент. Пары объединяются в группу, если величина z между ними не превосходит порог z_0 . Если число пар в группе достигает N , то объявляется тревога возможного возникновения землетрясения магнитуды M и выше на время T лет в круге радиуса R километров с центром в геометрическом центре середин отрезков, соединяющих основной толчок и афтершок в этих N парах.

Для подбора оптимальных параметров и оценки эффективности алгоритма прогноза построена диаграмма ошибок (см. рис.), на которой по горизонтальной оси откладывается величина относительного пространственно-временного объема тревог, рассчитываемого с учетом распределения эпицентров землетрясений, а по вертикальной оси откладывается доля пропусков целей. Каждый набор параметров изображается на диаграмме в виде одной точки, и алгоритм считается тем более успешным, чем ближе точка к началу координат. На рисунке показана также кривая случайного угадывания с вероятностью 0.001%, которая показывает высокую значимость полученных результатов прогноза.

В работе используется каталог Курило-Камчатской зоны субдукции, содержащий 12 событий магнитуды 7.5 и выше, которые авторы попытались ретроспективно предсказать. Из 12 целей были предсказаны 11, в том числе землетрясение M8.8 30 июля 2025 года.

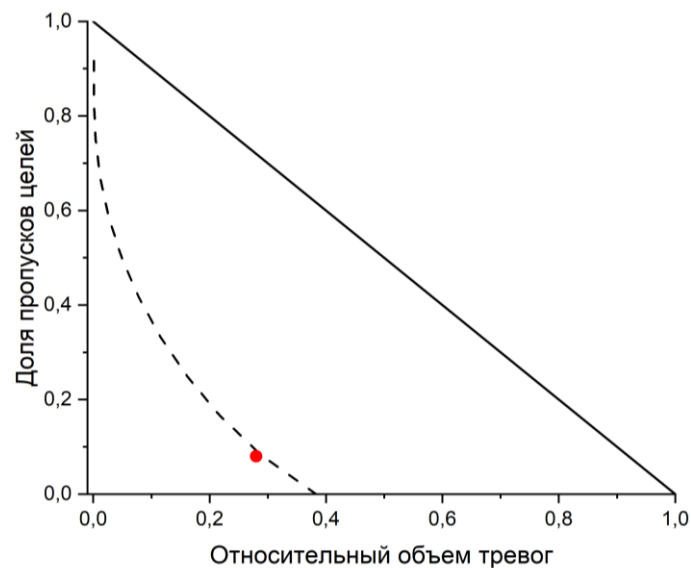


Рис. Диаграмма ошибок. Красной точкой показаны значения объема тревог и доли пропусков целей для набора параметров, дающего наиболее успешный прогноз. Черным прямым отрезком показана диагональ случайного угадывания. Пунктирной кривой показана кривая случайного угадывания с вероятностью 0.001%

Наиболее удачный набор параметров обеспечивает величину относительного объема тревог 0.28 и доли пропусков целей 0.08. Значения параметров этого набора: $n = 6$, $N = 3$, $M = 7.5$, $z_0 = 250$, $R = 250$, $T = 2.5$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (проект № 25-17-00094).

Литература

- Prozorov A., Schreider S. Real time test of the long-range aftershock algorithm as a tool for mid-term earthquake prediction in Southern California // Pure and Applied Geophysics. 1990. V. 133. P. 329–347. DOI: [10.1007/BF00877167](https://doi.org/10.1007/BF00877167) EDN: [XPBCEB](https://www.edn.ru/XPBCEB)
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in Southern California I: Identification and stability // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2013. V. 118. № 6. P. 2847–2864. DOI: [10.1002/jgrb.50179](https://doi.org/10.1002/jgrb.50179) EDN: [KYWFCFA](https://www.edn.ru/KYWFCFA)
- Wells D., Coppersmith K. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 1994. V. 84. P. 974–1002. DOI: [10.1785/BSSA0840040974](https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974)

REMOTE AFTERSHOCKS EMERGENCE BEFORE STRONG EARTHQUAKES

Fedorova M.G., Krushelnitskii K.V.

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

Email: mfedorova356@gmail.com

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИЛЬНЫХ КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2025 Г. ($M_w > 7.0$) ПО ТЕЛЕСЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Филиппова А.И.^{1,2}, Фомочкина А.С.^{1,3}

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк

³ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва

E-mail: aleirk@mail.ru

(устный доклад)

В настоящей работе по записям поверхностных волн, зарегистрированных на телесейсмических расстояниях, для Камчатского землетрясения 29 июля 2025 г. с $M_w = 8.7$, его форшока (20 июля 2025 г., $M_w = 7.5$) и двух афтершоков (13 и 18 сентября 2025 г., $M_w = 7.4$ и $M_w = 7.9$ соответственно) 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. Спектры волн Рэлея и Лява определялись с помощью метода спектрально-временного анализа [Левшин и др., 1986].

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 знаки первых вступлений P -волн на удаленных станциях. В приближении сдвиговой дислокации эллиптической формы оценивались шесть интегральных параметров, характеризующих геометрию разрыва и развитие очага во времени: продолжительность процесса в очаге (Δt), 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 (ϕ_l), угол между направлением движения мгновенного центроида и осью простирания (ϕ_v) [Bukchin, 1995]. Для возможной идентификации истинной плоскости разрыва [Букчин, 2017] расчеты проводились для обеих нодальных плоскостей фокальных механизмов, полученных на предыдущем этапе.

Результаты наших расчетов показывают, что очаги всех исследуемых землетрясений сформировались под влиянием преобладающего субгоризонтального сжатия СЗ-ЮВ ориентации. В приближении мгновенного точечного источника наши оценки хорошо согласуются с результатами, опубликованными на текущий момент времени сейсмологическими агентствами. Для всех событий проанализирована возможность выделения истинной плоскости разрыва. В приближении сдвиговой дислокации эллиптической формы было показано, что длительность разрывообразования для основного

толчка 29 июля 2025 г. составила около 130 с, а длина разрыва – 600 км. Значение последнего параметра хорошо согласуется с моделью USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/finite-fault>, по состоянию на 1 октября 2025 г.), в то время как наша оценка длительности источника несколько меньше, чем в данной модели. При этом интересно отметить близость обоих обсуждаемых параметров для исследуемого события и Чилийского землетрясения 27 февраля 2010 г. с близкой моментной магнитудой ($M_w = 8.8$) (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official20100227063411530_30/finite-fault). Кроме того, полученная длина разрыва (L , км) близка к известным оценкам для Камчатского землетрясения 4 ноября 1952 г.: $L = 500$ км, $M_w = 8.8$ [Johnson, Satake, 1999] и $L = 650$ км, $M_w = 9.0$ [Kanamori, 1976].

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) EDN: [YIUUVIX](https://www.edn.ru/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.
- 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) EDN: [XOMHPT](https://www.edn.ru/10.1016/0040-1951(94)00271-A)
- Johnson J.M., Satake K. Asperity Distribution of the 1952 Great Kamchatka Earthquake and its Relation to Future Earthquake Potential in Kamchatka // Pure and Applied Geophysics. 1999. V. 154. P. 541–553. DOI: [10.1007/s000240050243](https://doi.org/10.1007/s000240050243) EDN: [LRFPLZ](https://www.edn.ru/10.1007/s000240050243)
- Kanamori H. Re-examination of the Earth's free oscillations excited by the Kamchatka earthquake of November 4, 1952 // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1976. V. 11. P. 216–226. DOI: [10.1016/0031-9201\(76\)90066-2](https://doi.org/10.1016/0031-9201(76)90066-2) EDN: [XQWIZJ](https://www.edn.ru/10.1016/0031-9201(76)90066-2)

SOURCE PARAMETERS OF THE STRONG KAMCHATKA EARTHQUAKES IN 2025 ($M_w > 7.0$) FROM TELESEISMIC DATA

Filippova A.I.^{1,2}, Fomochkina A.S.^{1,3}

¹ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS, Moscow

² Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave
Propagation, RAS, Moscow, Troitsk

³ National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow

E-mail: aleirk@mail.ru

МОДИФИЦИРОВАННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА СМЕЩЕНИЙ В ОЧАГЕ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЦУНАМИ

Филиппова А.И.^{1,2}, Фомочкина А.С.^{1,3}, Владимирова И.С.^{1,4}, Габсатаров Ю.В.^{4,5},
Цуканова Е.С.⁴, Медведев И.П.⁴

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва г. Троицк

³ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

⁴ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

⁵ Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», г. Обнинск

E-mail: ir.s.vladimirova@yandex.ru

(устный доклад)

В работе предлагается модифицированная методика расчета смещений в очаге землетрясения по данным ГНСС-наблюдений. В традиционном подходе, описанном в [Steblov, Vladimirova, 2023], размеры очаговой области задаются по распределению афтершоков за первые один-два месяца после основного толчка (рис. 1а), поскольку именно за этот период афтершоки полностью очерчивают очаг. Ориентация очаговой зоны в рамках такого подхода определяется результатами аппроксимации профиля субдукционной зоны.

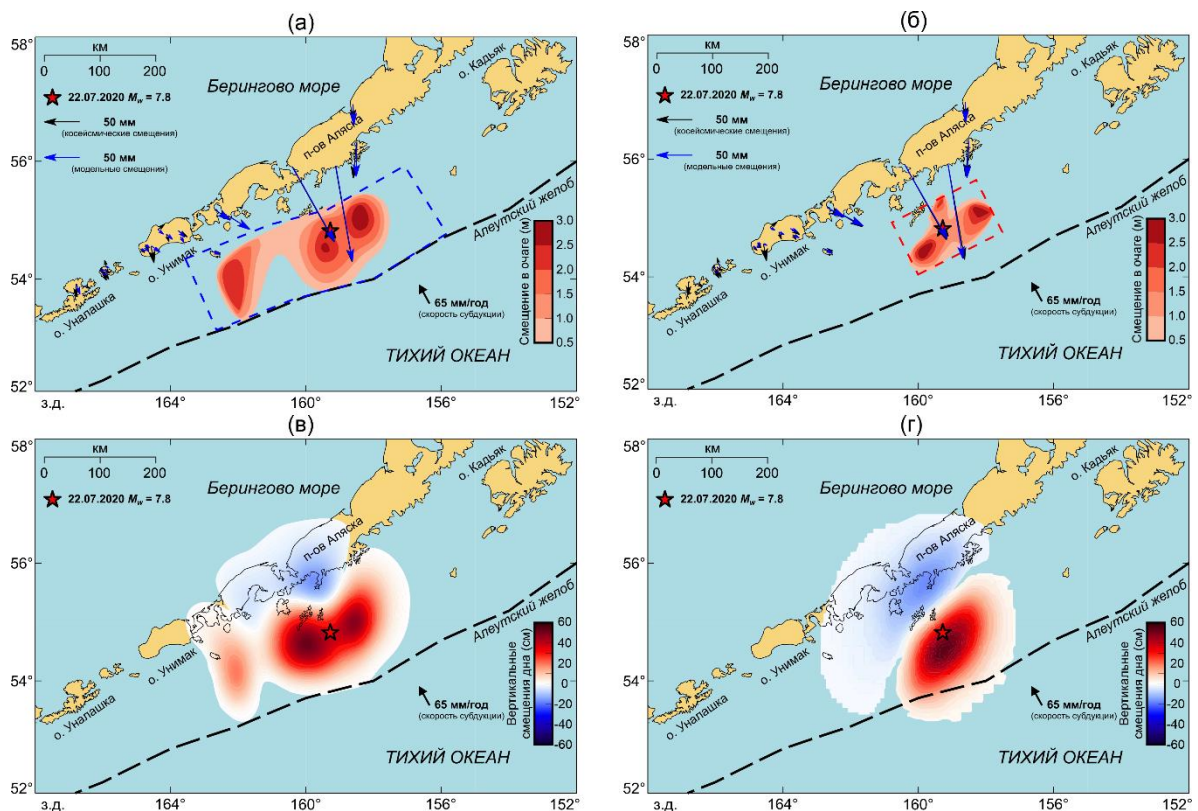


Рис. 1. Сравнение традиционного и модифицированного подходов: (а) модель очага, традиционный подход; (б) модель очага, модифицированный подход; (в) вертикальные смещения морского дна, традиционный подход; (г) вертикальные смещения морского дна, модифицированный подход. Синяя пунктирная линия – размеры очага, определенные по облаку афтершоков, красная пунктирная линия – границы очага, определенные по амплитудным спектрам поверхностных волн

В предлагаемой методике в качестве исходных данных используются оценки параметров плоскости разрыва и размеров очага, определяемые по амплитудным спектрам

поверхностных волн [Filippova et al., 2025]. Такой подход позволяет одновременно определять геометрические размеры и ориентацию очага, существенно сокращая время на моделирование смещений в очаге, что особенно важно для задач оперативного прогнозирования цунами.

Предлагаемая методика была апробирована на серии сильных ($M_W \geq 7.5$) землетрясений, произошедших в 2020–2021 гг. в Алеутской зоне субдукции: 22.07.2020 ($M_W = 7.8$), 19.10.2020 ($M_W = 7.6$) и 29.07.2021 ($M_W = 8.2$). На рис. 1 приведено сопоставление результатов применения традиционного и модифицированного подходов. В рамках традиционной методики получается более протяженная область смещений (рис. 1а), тогда как в рамках модифицированного подхода – более компактное распределение подвижек (рис. 1б), однако локализация и величина максимальных смещений сохраняются. Аналогичная закономерность прослеживается и в картинах вертикальных смещений морского дна, рассчитанных на основе этих моделей: в первом случае область поднятия и опускания чуть более обширна (рис. 1в), во втором – несколько более сконцентрирована (рис. 1г), однако амплитуды вертикальных смещений и площади деформированных участков морского дна в обоих случаях достаточно близки, а именно эти факторы являются ключевыми при генерации цунами. Таким образом, модифицированная методика обеспечивает более быстрое и достаточно адекватное определение вертикальных смещений морского дна, что имеет принципиальное значение для последующего оперативного моделирования цунами.

Литература

- Filippova A., Fomochkina A., Kossobokov V., Nekrasova A. Characterizing the foreshock, main shock, and aftershock sequences of the recent major earthquakes in Southern Alaska, 2020–2024 // *Frontiers in Earth Science*. 2025. V. 13. 1660221. DOI: [10.3389/feart.2025.1660221](https://doi.org/10.3389/feart.2025.1660221)
- Steblov G., Vladimirova I. Geodetic Inversions and Applications in Geodynamics // *Applications of Data Assimilation and Inverse Problems in the Earth Sciences* / A. Ismail-Zadeh, F. Castelli, D. Jones, S. Sanchez (Eds.) Cambridge: Cambridge University Press, 2023. P. 278–292. DOI: [10.1017/9781009180412.019](https://doi.org/10.1017/9781009180412.019)

MODIFIED METHOD FOR FAULT-PLANE DISPLACEMENT CALCULATION FOR EARLY TSUNAMI PREDICTION

Filippova A.I.^{1,2}, Fomochkina A.S.^{1,3}, Vladimirova I.S.^{1,4}, Gabsatarov Y.V.^{4,5},
Tsukanova E.S.⁴, Medvedev I.P.⁴

¹ *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow*

² *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave
Propagation, RAS, Moscow, Troitsk*

³ *National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow*

⁴ *Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow*

⁵ *Geophysical Survey, RAS, Obninsk*

E-mail: ir.s.vladimirova@yandex.ru

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЗМА ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО ДАННЫМ DAS: ОБЗОР

Филиппова А.И.^{1,2}, Фомочкина А.С.^{1,3}, Кислов К.В.¹, Винберг Ф.Э.¹

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк

³ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва

E-mail: aleirk@mail.ru

(стендовый доклад)

В данной работе проведен обзор методов, позволяющих определить механизм очага землетрясения с использованием данных распределенного акустического зондирования (Distributed Acoustic Sensing, DAS). Технология DAS позволяет преобразовать оптоволоконные кабели в плотные экономичные сейсмические массивы и имеет ряд достоинств относительно стандартных сейсмических сетей (высокое пространственное разрешение, широкий частотный диапазон, возможность использования темных волокон уже существующих телекоммуникационных кабелей и т.д.) [Кислов, Гравиров, 2022].

Разностный метод определения фокального механизма (оценивается разница в механизмах для группы событий) применен в работах [Karrenbach et al., 2017; Cole et al., 2018], посвященных анализу микросейсм по данным DAS в скважинах. Несмотря на невозможность однозначного определения механизма для единичного события, такой подход позволяет проследить различия в механизмах отдельных событий в группе, что способствует классификации микросейсм.

В работе [Vera Rodriguez, Wuestefeld, 2020] аналитически выведены выражения, описывающие поле деформаций от точечного источника (измеряемым параметром в DAS является осевая деформация оптоволоконка), заданного тензором сейсмического момента, для случая изотропной среды и рассмотрено применение полученных результатов для исследований микросейсм. Показано, что по данным всего с одной наклонной или горизонтальной скважины можно однозначно восстановить все компоненты тензора. Однако устойчивость такой процедуры инверсии существенно зависит от учета настроек интеррогатора DAS, базы измерений (GL), что затрудняет ее применение для рутинных определений очаговых параметров.

Наиболее перспективной с точки зрения массового применения, вероятно, является процедура совместной инверсии данных традиционных сейсмодатчиков и DAS, предложенная, например, в работе [Li et al., 2023]. В предложенной методике используются поканальные взаимные корреляции между *P*-волнами пар землетрясений и корреляции между отдельными каналами для каждого события. Положительный коэффициент

корреляции (с разрешением в десятки метров) указывает на одинаковую полярность, отрицательный, наоборот, обозначает различие в знаках первых вступлений. При этом для однозначного установления полярностей по всем измерениям достаточно откалибровать всего лишь один канал для одного события. Обсуждаемый метод может применяться как самостоятельно, так и совместно с методикой [Funabiki, Miyazawa, 2025], в которой по данным DAS предлагается определять также отношение максимальных амплитуд волн S и P .

В настоящее время нами ведется апробация методик [Li *et al.*, 2023; Funabiki, Miyazawa, 2025] с использованием открытых источников данных DAS и бесплатных пакетов для их обработки. Предполагается выявить ряд особенностей и ограничений методики, не обсуждаемых в первоначальной работе: сформулировать ряд требований к расположению оптоволоконного кабеля относительно эпицентров исследуемых событий, определить возможность выявления сложных очагов землетрясений и т.д.

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) EDN: [HOAIXQ](https://www.edn.ru/10.21455/si2022.2-1)
- Cole S., Karrenbach M., Kahn D., Rich J., Silver K., Langton D. Source parameter estimation from DAS microseismic data // SEG Technical Program Expanded. Abstracts. 2018. P. 4928–4932. DOI: [10.1190/segam2018-2995716.1](https://doi.org/10.1190/segam2018-2995716.1)
- Funabiki Y., Miyazawa M. Estimating focal mechanism of small earthquakes using S/P amplitude ratios of distributed acoustic sensing records // Geophysical Research Letters. 2025. V. 52. e2024GL113963. DOI: [10.1029/2024GL113963](https://doi.org/10.1029/2024GL113963)
- Karrenbach M., Kahn D., Cole S., Ridge A., Boone K., Rich J., Silver K., Langton D. Hydraulic-fracturing-induced strain and microseismic using in situ distributed fiber-optic sensing // The Leading Edge. 2017. V. 36. P. 837–844. DOI: [10.1190/tle36100837.1](https://doi.org/10.1190/tle36100837.1)
- Li J., Zhu W., Biondi E., Zhan Z. Earthquake focal mechanisms with distributed acoustic sensing // Nature Communications. 2023. V. 14. 4181. DOI: [10.1038/s41467-023-39639-3](https://doi.org/10.1038/s41467-023-39639-3) EDN: [PKLSFG](https://www.edn.ru/10.1038/s41467-023-39639-3)
- Vera Rodriguez I., Wuestefeld A. Strain microseismics: Radiation patterns, synthetics, and moment tensor resolvability with distributed acoustic sensing in isotropic media // Geophysics. 2020. V. 85. No. 3. P. KS101–KS114. DOI: [10.1190/GEO2019-0373.1](https://doi.org/10.1190/GEO2019-0373.1)

EARTHQUAKE FOCAL MECHANISM DETERMINATION METHODS FROM DAS DATA: A REVIEW

Filippova A.I.^{1,2}, Fomochkina A.S.^{1,3}, Kislov K.V.¹, Vinberg F.E.¹

¹ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

² Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave
Propagation, RAS, Moscow, Troitsk

³ National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow

E-mail: aleirk@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ СЦЕНАРНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДОВ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

Фролова Н.И.¹, Габсатарова И.П.², Суцев С.П.³, Угаров А.Н.³, Малаева Н.С.^{1,4}

¹ Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва

² Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», г. Обнинск

³ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

⁴ Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам
гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, г. Москва

E-mail: frolovanina7@mail.com

(устный доклад)

В работе решается задача оценки последствий сценарных землетрясений на территории Краснодарского края, активно развивающегося в народно-хозяйственном плане в последнее время. Исследуется историческая сейсмичность в крае для уточнения уравнения затухания сейсмической интенсивности, что является необходимым этапом калибровки, применяемой для моделирования последствий системы «Экстремум». Актуальность исследования определяется необходимостью получения надежных оценок возможных потерь от землетрясений для оперативно-аналитической работы при планировании превентивных мероприятий для уменьшения возможного ущерба и на случай оперативного реагирования на только что произошедшее событие в целях повышения безопасности населения в сейсмоопасных районах Краснодарского края.

Для исследования выбраны сценарные землетрясения в наиболее опасных зонах ВОЗ вблизи г. Краснодара и г. Туапсе, исторические землетрясения 21 июля 1936 г. с $M = 4.4$, 03 сентября 1978 г. с $M_w = 5.7$ и 15 февраля 1994 г. с $M = 4.4$, учтены результаты палеосейсмологических и архисейсмологических исследований.

Собраны сведения об ощутимости в 1850 населенных пунктах Северного Кавказа от 32 сильных землетрясений (6–7 и более баллов по шкале MSK-64) за 1966–2012 гг., построены графики затухания, рассчитаны индивидуальные для каждого землетрясения и средние для зоны параметры макросейсмического поля по уравнению Н.В. Шебалина для каждого из выделенных ранее районов [Фролова и др., 2019]. Для Краснодарского края коэффициенты макросейсмического поля уточнены на основе данных макросейсмических проявлений после 21 землетрясения с $M \geq 4$ с эпицентрами на территории края и ближайшего окружения. Полученные значения коэффициентов макросейсмического поля, преобладающая ориентация поля и отношение полуосей эллиптической изосейсты больших баллов были использованы в расчетах последствий сценарных событий.

Для повышения надежности результатов моделирования последствий сценарных землетрясений выполнена актуализация распределения зданий разного типа по шкале MMSK-86 [Шебалин и др., 1986] для населенных пунктов Краснодарского края. Проанализирована информация с сайта «Реформа ЖКХ» (<https://www.reformagkh.ru>)

о материале несущих стен и перекрытий в многоквартирных домах, количестве этажей, квартир и подъездов в доме и численности жителей. Дополнительно совместно обработаны космические снимки и «фотопанорамы», предоставляемые сервисами компании Яндекс.

На рис. 1 и 2 приведены примеры расчета последствий сценарных землетрясений с помощью откалиброванных моделей и актуализированных баз данных системы «Экстремум», значками разного размера показаны города с разной численностью населения, цвет значка – средняя степень повреждения застройки в населенном пункте: $d_{ср.} = 0$; $d_{ср.} = 1$; $d_{ср.} = 2$; $d_{ср.} = 3$; $d_{ср.} = 4$; $d_{ср.} = 5$.

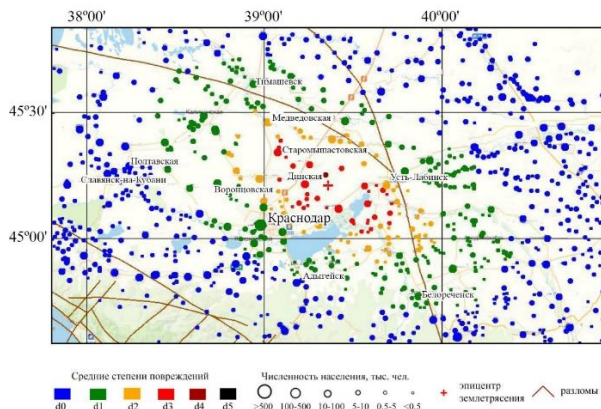


Рис. 1. Последствия сценарного события в зоне ВОЗ
вблизи г. Краснодара с $M = 5.8$, $h = 15$ км

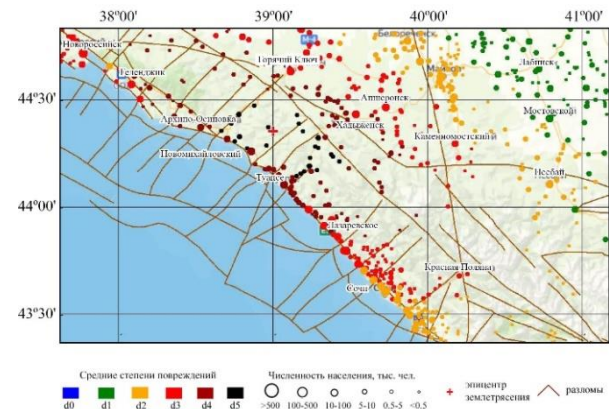


Рис. 2. Последствия сценарного события в зоне
ВОЗ вблизи г. Туапсе с $M = 6.5$, $h = 30$ км

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № 122022400105-9 «Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий», государственного задания ФИЦ ЕГС РАН № 075-01471-22.

Литература

- Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Петрова Н.В., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Влияние особенностей затухания сейсмической интенсивности на надежность оперативных оценок потерь от землетрясений // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2019. № 5. С. 23–37. DOI: [10.31857/S0869-78092019523-37](https://doi.org/10.31857/S0869-78092019523-37) EDN: [CEPYTD](https://www.edn.ru/CEPYTD)
- Шебалин Н.В., Еришов И.А., Шестоперов Г.С., Гехман А.С. Улучшенный вариант шкалы сейсмической интенсивности (MMSK-86) на базе шкал MSK-64 и MCCC-73 (заключительный отчет). М.: МССС, ИФЗ, 1986. 61 с.

SIMULATION OF SCENARIO EARTHQUAKES CONSEQUENCES FOR CITIES IN THE KRASNODAR REGION

Frolova N.I.¹, Gabsatarova I.P.², Suchshev S.P.³, Ugarov A.N.³, Malaeva N.S.^{1,4}

¹ Sergeev Institute of Environmental Geosciences, RAS, Moscow

² Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Obninsk, Kaluga region

³ Bauman Moscow State Technical University, Moscow

⁴ Russian Scientific Research Institute for Civil Defence and Emergencies,
EMERCOM of Russia, Moscow

E-mail: frolovanina7@gmail.com

РАСПРЕДЕЛЁННЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ (DAS) КОМПАНИИ T8 ДЛЯ ГЕОФИЗИКИ И СЕЙСМОЛОГИИ. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ И МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ РАБОТЫ

Харасов Д.Р.¹, Наний О.Е.^{1,2}, Трешиков В.Н.¹

¹ Группа компаний T8, г. Москва

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

E-mail: kharasov@t8.ru

(устный доклад)

Распределённые акустические датчики (Distributed Acoustic Sensing – DAS) находят широкое применение для задач охраны периметра, мониторинга состояния трубопроводов, в том числе системах обнаружения утечек, сейсморазведке, шумометрии, а также для сейсмологии [Никитин и др., 2023а].

В докладе рассказывается о принципах работы приборов для распределённого акустического зондирования (Distributed Acoustic Sensing – DAS); анализируется влияние длительности импульса и базы измерения на чувствительность прибора, линейность отклика, дальность работы; описываются способы и показываются результаты экспериментов по увеличению дальности работы DAS до ~200 км на одно устройство, часть из которых были применены в серийном DAS «Дунай» компании T8 и внедрены в проекты заказчиков [Харасов и др., 2024]. Также приведены примеры сигналов землетрясений, записанных в рамках мероприятия «Global DAS monitoring month February 2023» [Wuestefeld et al., 2024; Никитин и др., 2023б], а также результаты активного мониторинга ледяного покрова.

Литература

- Никитин С.П., Кислов К.В., Старовойт Ю.О., и др. Возможности и перспективы использования распределённых оптоволоконных датчиков в геофизике // Приборы и техника эксперимента. 2023а. № 5. С. 153–158. DOI: [10.31857/S0032816223050191](https://doi.org/10.31857/S0032816223050191) EDN: [ZVBDKA](https://www.edn.ru/ZVBDKA)
- Никитин С.П., Спиридонов Е.П., Кислов К.В., и др. Экспериментальные результаты регистрации землетрясений с помощью когерентных рэлеевских рефлектометров // Фотон-экспресс. 2023б. № 6 (190). С. 282–283. DOI: [10.24412/2308-6920-2023-6-282-283](https://doi.org/10.24412/2308-6920-2023-6-282-283) EDN: [JTQXVX](https://www.edn.ru/JTQXVX)
- Харасов Д.Р., Фомиряков Э.А., Бенгальский Д.М., и др. Распределённый акустический датчик на базе фазочувствительного рэлеевского рефлектометра с протяжённостью работы ≥ 200 км // XI Международный семинар по волоконным лазерам: Материалы семинара, Новосибирск, 19–25 августа 2024 года. Новосибирск: Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 2024. С. 97–98. DOI: [10.31868/RFL.2024.97-98](https://doi.org/10.31868/RFL.2024.97-98) EDN: [HIRKJT](https://www.edn.ru/HIRKJT)
- Wuestefeld A., Spica Z.J., Aderhold K., et al. The global DAS month of February 2023 // Seismological Research Letters. 2024. Т. 95. № 3. С. 1569–1577. DOI: [10.1785/0220230180](https://doi.org/10.1785/0220230180)

**T8 DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSORS (DAS) FOR GEOPHYSICS
AND SEISMOLOGY. APPLICATION EXAMPLES AND EXTENDING OPERATION
RANGE METHODS**

Kharasov D.R.¹, Nanii O.E.^{1,2}, Treshchikov V.N.¹

¹ *T8 Company group, Moscow*

² *Lomosov Moscow State University, Moscow*

E-mail: kharasov@t8.ru

РЕШЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ГЕНЕРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВО ВНЕШНИХ ОБЛАСТЯХ ГАЛАКТИКИ С УЧЕТОМ РАСШИРЕНИЯ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ДИСКА

Хасаева Т.Т.^{1,2}

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

² *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*

E-mail: justanyan@yandex.ru

(устный доклад)

В настоящее время существование магнитных полей в ряде космических объектов подтверждается наблюдениями. Так, о существовании галактического магнитного поля свидетельствует, например, фарадеевское вращение плоскости поляризации радиоволн, исходящих от таких космических объектов, как, например, пульсары [Андреасян и др., 2020]. Как правило, генерацию такого поля принято объяснять действием механизма динамо, суть которого заключается в преобразовании механической энергии турбулентных движений в энергию магнитного поля, однако существование иных эффектов, участвующих в генерации галактического магнитного поля, также нельзя отрицать.

Ранее существенное число работ, посвященных исследованию галактических магнитных полей, рассматривали генерацию поля на расстояниях, не превышающих 10 кпк от центра галактического диска [Михайлов, 2020], где условия работы механизма динамо, как правило, выполнены. В то же время существуют свидетельства возможности генерации поля и на расстояниях более 15 кпк [Mikhailov et al., 2014], в так называемых периферийных областях галактики. Несмотря на то, что поле, возникающее на таких расстояниях от центра, существенно меньше, оно также может сформироваться в регулярную структуру, не затухнув прежде.

В рамках численного исследования такого поля необходимо также учитывать ряд факторов, таких как расширение галактического диска по мере удаления от центра [Randriamampandry et al., 2021]. Для изучения возможности и результата генерации магнитного поля в таких условиях была сформулирована и решена задача на собственные значения, характеризующая магнитное поле во внешних областях галактики с учетом расширения галактического диска по мере удаления от его центра. Численное решение данной задачи было найдено путем использования обратного степенного метода и классического метода прогонки, удобного для решения систем линейных уравнений, возникающих в нашем исследовании.

Поскольку природа магнитогидродинамических явлений в геофизике и астрофизике схожи, а уравнения Максвелла, лежащие в основе моделей, одни и те же, методы, применяемые для изучения космического магнетизма, могут быть также применены для изучения магнитного динамо Земли.

Литература

- Андреасян Р.Р., Михайлов Е.А., Андреасян А.Р.* Структура и особенности формирования инверсий галактического магнитного поля // *Астрономический журнал*. 2020. Т. 97. № 3. С. 179–189. DOI: [10.31857/S0004629920030019](https://doi.org/10.31857/S0004629920030019) EDN: [KRVNOI](https://www.edn.ru/KRVNOI)
- Михайлов Е.А.* Спектральное разложение решения задачи о генерации магнитных полей галактик в планарном приближении // *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2020. № 5. С. 39–44. EDN: [HHJJRH](https://www.edn.ru/HHJJRH)
- 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) EDN: [UEVHMF](https://www.edn.ru/UEVHMF)
- Randriamampandry T.H., Wang J., Mogotsi K.M.* The BLUEDISK Survey: Thickness of H I Layers in Gas-rich Spiral Galaxies // *The Astrophysical Journal*. 2021. V. 916. № 1. 26. DOI: [10.3847/1538-4357/ac0442](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac0442) EDN: [HBBLVY](https://www.edn.ru/HBBLVY)

THE SOLUTION OF THE SPECTRAL MAGNETIC FIELD GENERATION PROBLEM IN THE OUTER REGIONS OF THE GALAXY, TAKING INTO ACCOUNT THE EXPANSION OF THE GALACTIC DISK

Khasaeva T.T.^{1,2}

¹ *Lomosov Moscow State University, Moscow*

² *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow*

E-mail: justanyan@yandex.ru

**КАМЧАТСКОЕ МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 29 ИЮЛЯ 2025 Г. ($M_w = 8.8$).
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА**

Чебров Д.В.

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая
геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский*

E-mail: danila@emsd.ru

(устный доклад)

В докладе представлены предварительные результаты обработки самого сильного землетрясения Камчатки за последние 73 года по данным региональной системы наблюдений. Приведены данные о системе сейсмологических и геофизических наблюдений на Камчатке. Приведены данные о работе Системы предупреждения о цунами. Обсуждаются общие сведения об очаге землетрясения: его тектоническая позиция, механизм, ход афтершокового процесса и его место в контексте сейсмической истории Южной Камчатки. Размер очага, оцененный по облаку афтершоков, составил 400×150 км. Дана краткая характеристика макросейсмического эффекта и волны цунами. Отмечены основные особенности этого землетрясения: совпадение с очагом 1952 г., наличие серии предвещающих сильных землетрясений в Авачинском заливе в период с 2023 по 2025 гг., периферийное положение сильнейших афтершоков. Также отмечено, что факт повторного мегаземлетрясения ($M = 8.8-9.0$) в одном и том же очаге нарушает сложившиеся представления о сейсмическом цикле.

**KAMCHATKA MEGA EARTHQUAKE ON JULY 29, 2025 ($MW=8.8$).
PRELIMINARY RESULTS OF DATA PROCESSING
OF THE REGIONAL MONITORING SYSTEM**

Chebrov D.V.

Kamchatka Branch of the Geophysical Survey, RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky

E-mail: danila@emsd.ru

КВАЗИ-КОЛМОГОРОВСКИЙ РЕЖИМ ФРАГМЕНТАЦИИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ЗОНАХ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Чинкин В.Е., Остапчук А.А.

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

E-mail: chinkin.ve@idg.ras.ru

(устный доклад)

Процессы хрупкой фрагментации, протекающие в земной коре, охватывают масштабы от 10^{-8} м (кристаллы) до 10^7 м (литосферные плиты). Наиболее активно хрупкая фрагментация проявляется в зонах тектонических разломов. Статистические закономерности фрагментации впервые описаны А.Н. Колмогоровым [Kolmogorov, 1941]. Он показал, что в пределе больших времен фрагментация описывается логнормальным законом при условиях 1) вероятность разрушения частицы независима от её размера и 2) распределение по относительным размерам при дроблении не зависит от исходного размера.

В данной работе была исследована статистика фрагментации горных пород Байкальской рифтовой зоны, полученная на основе анализа изображений цирконов, шлифов горных пород, скальных обнажений и цифровой модели рельефа Байкальской рифтовой зоны. Показано, что наилучшее описание статистики показала модель логнормального распределения. При этом параметр разброса распределения оказался практически одинаковым и менялся в пределах от 1.4 до 2.0 (см. рис.). Данное обстоятельство сходится с теорией Колмогорова в части логнормального распределения, однако отличается в части поведения параметра разброса.

Математическое описание статистики процессов фрагментации в условиях сдвигового деформирования представляется в виде линейного уравнения фрагментации:

$$\frac{\partial}{\partial t} c(x, t) = -R(x)c(x, t) + \int_x^\infty R(y)K(x, y)c(y, t)dy.$$

Ранее уравнение решалось для случаев, сохраняющих условие Колмогорова о самоподобном ядре: в случае степенного ядра стационарное решение описывается при помощи гамма-функции [Peterson, 1986] для степенного ядра или q -статистикой для дельта-ядра [Agazzotti et al., 2025]. Нами рассмотрен общий случай квази-колмогоровского режима фрагментации. При самоподобном дроблении допущена степенная зависимость интенсивности фрагментации от размеров частиц, но показатель степени считался малым, а также ядро считалось произвольным. Установлено, что в этом режиме распределение фрагментов так же асимптотически стремится к логнормальному распределению, при этом

параметр разброса отличается от чисто колмогоровского режима и асимптотически по времени стремится к постоянному значению.

Проведенный анализ статистики фрагментов показал, что чисто колмогоровская модель фрагментации не применима для широкого диапазона размеров, так как не объясняет сохранение разброса частиц по размерам, однако квази-колмогоровская модель, которая допускает малое отличие интенсивности фрагментации, полностью описывает результат эксперимента.

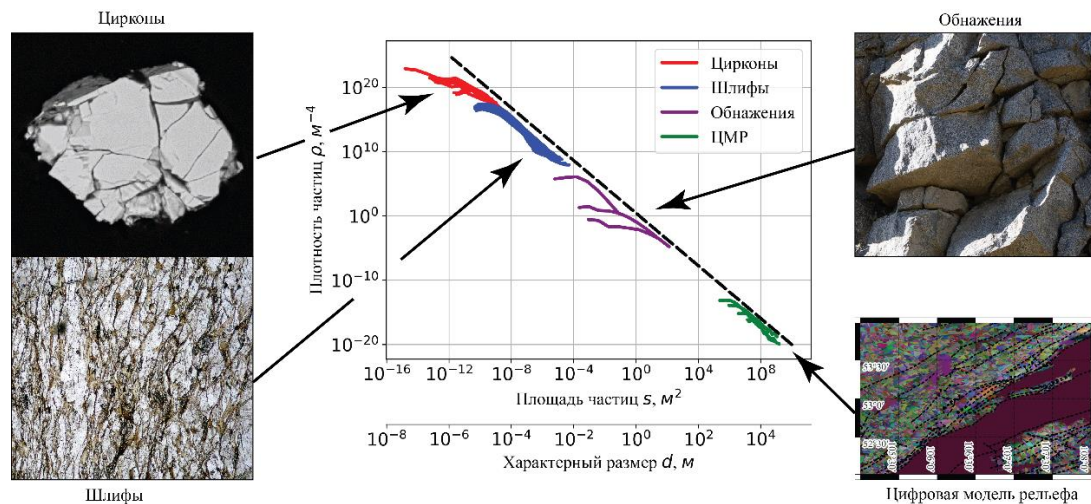


Рис. Распределение плотности числа фрагментов

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИДГ РАН № 125012700824-4.

Литература

- Agazzotti G., Deaconu M., Lejay A. Long time asymptotic behavior of a self-similar fragmentation equation // *Nonlinear Analysis*. 2025. V. 257. 113805. DOI: [10.1016/j.na.2025.113805](https://doi.org/10.1016/j.na.2025.113805)
- Kolmogorov A.N. On the log-normal law of distribution of particles during fragmentation // *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1941. V. 31. P. 99–101.
- Peterson T.W. Similarity Solutions for the Population Balance Equation Describing Particle Fragmentation // *Aerosol Science and Technology*. 1986. V. 5. P. 93–101. DOI: [10.1080/02786828608959079](https://doi.org/10.1080/02786828608959079) EDN: [KHKWSD](https://www.edn.ru/khkwSD)

QUASI-KOLMOGOROV REGIME OF ROCK FRAGMENTATION IN AREAS OF EARTHQUAKE NUCLEATION

Chinkin V.E., Ostapchuk A.A.

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, RAS, Moscow

E-mail: chinkin.ve@idg.ras.ru

О СПОСОБАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГНОЗА СОБЫТИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

Шнирман М.Г., Елаева М.С., Блантер Е.М.

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

E-mail: shnir@mitp.ru

(устный доклад)

Физика Земли и Солнца имеет дело со сложной системой, наблюдения которой представляют собой нестационарные временные ряды, включающие события разного масштаба. Модели для таких систем или используют гипотезы стационарности и однородности, воспроизводя среднее поведение системы (например, модели солнечного динамо), или фокусируются на событиях (солнечные пятна на Солнце или землетрясения в геофизике), не используя их для оценивания свойств системы в целом. Наша работа представляет собой теоретическую попытку объединить эти два подхода и использовать знания о событиях при решении обратной задачи и восстановления средних свойств эволюции системы.

Мы исследуем цепочку из нелинейно связанных осцилляторов Курамото [Kuramoto, 1975], в которой возникают нарушения синхронизации, связанные с медленной вариацией естественных частот. Мы рассматриваем два типа нарушения синхронизации: слабые события (экскурсии), при которых разница фаз на короткое время выходит из зоны устойчивой синхронизации, но потом возвращается к прежним значениям, и экстремальные события, при которых устойчивость достигается на значениях, отличающихся от исходных на 2π . Модель применялась для работы в двух направлениях: (1) использование слабых событий (экскурсий) для ограничения многомерной области восстанавливаемых параметров (применение к Солнцу) [Blanter, Shnirman, 2025]; (2) использование прогнозируемости экстремальных событий для оценки локальной прочности (связности) среды. В первом направлении мы получили, что условия возникновения экскурсий дают ограничения на параметры системы, которые, в применении к солнечным данным, позволяют с хорошей точностью оценить амплитуду долговременной вариации меридионального потока вблизи солнечных полюсов, где прямые наблюдения недоступны (рис. 1). Во втором направлении мы обнаружили, что ошибка прогноза сильных событий, производимая по предвестнику асимметрии параметра порядка [Elaeva и др., 2023], воспроизводит средний параметр порядка в системе (рис. 2), но, в отличие от него, не требует знания внутренних значений коэффициентов связи и может быть оценена из наблюдений. Таким образом, прогнозируемость экстремальных событий накладывает существенные ограничения на сами значения коэффициентов связности системы.

Несмотря на то, что наши результаты по большей части теоретические, потенциал их применения очень широк – от восстановления свойств приполярных областей в зоне

конвекции Солнца до исследования свойств трещиноватости сейсмоактивных регионов.

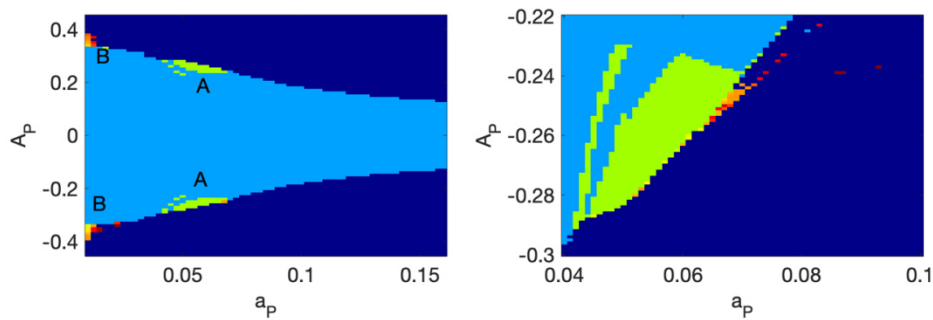


Рис. 1. Параметрическая область (зеленым, область A), выделяемая из области возможных значений амплитуд вариации меридиональной циркуляции (голубой) наблюдаемыми в Солнце экскурсиями. Слева дан общий вид, справа – увеличение зоны A

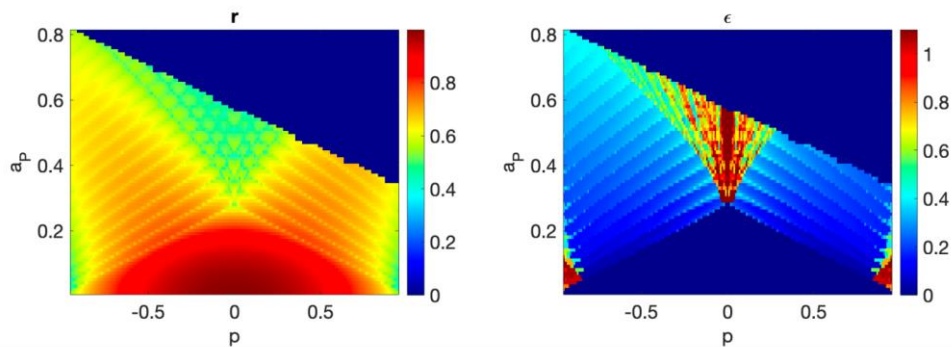


Рис. 2. Суммарная ошибка прогноза экстремальных событий в модели при фиксированных параметрах алгоритма (справа) воспроизводит средний параметр порядка (слева) вне зоны синхронизации (красная зона слева). Низкие значения параметра порядка (зеленые зоны слева) соответствуют высоким значениям ошибки прогноза (справа). Ошибка мала (синие зоны справа) там, где параметр порядка достаточно высок (оранжевые зоны слева)

Литература

- Blanter E., Shnirman M. Desynchronization Events in Solar Indices as a Manifestation of the North-South Asymmetry // Solar Phys. 2025. V. 300. P. 24. DOI: [10.1007/s11207-024-02419-3](https://doi.org/10.1007/s11207-024-02419-3) EDN: [FMFRYI](https://www.edn.ru/FMFRYI)
- Elaeva M., Blanter E., Shnirman M., Shapoval A. Asymmetry in the Kuramoto model with nonidentical coupling // Physical Review E. 2023. V. 107. P. 064201. DOI: [10.1103/physreve.107.064201](https://doi.org/10.1103/physreve.107.064201) EDN: [LFDCMF](https://www.edn.ru/LFDCMF)
- Kuramoto Y. Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators // International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics / Araki H. (ed.). Lecture Notes in Physics. V. 39. Berlin, Heidelberg: Springer, 1975. P. 420–422. DOI: [10.1007/BFb0013365](https://doi.org/10.1007/BFb0013365)

THE USE OF THE EXTREME EVENTS' PREDICTION IN THE INVERSE PROBLEM SOLUTION

Shnirman M.G., Elaeva M.S., Blanter E.M.

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

E-mail: shnir@mitp.ru

ЭВОЛЮЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ЧИЛИЙСКОЙ ЗОНЕ СУБДУКЦИИ В НАЧАЛЕ ХХІ ВЕКА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Щевьёва Н.С.¹, Владимирова И.С.^{1,2}

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

E-mail: shchevyeva.ns@ocean.ru

(устный доклад)

В начале ХХІ столетия в Чилийской зоне субдукции возникла серия сразу из трех сильнейших цунамигенных землетрясений с $M > 8$: Мауле 27 февраля 2010 г. ($M_W = 8.8$), Икике 1 апреля 2014 г. ($M_W = 8.1$) и Ильяпель 16 сентября 2015 г. ($M_W = 8.3$). Все три события были достаточно хорошо зарегистрированы сетями сейсмических и спутниковых геодезических наблюдений. В работе представлены результаты анализа развития сейсмического процесса в Чилийской зоне субдукции на основе имеющихся спутниковых геодезических и сейсмологических данных. В частности, было выполнено конечно-элементное моделирование очагов указанных событий (рис. 1) для сферически-симметричной слоистой модели Земли [Pollitz, 1996] на основе данных спутниковой геодезии.

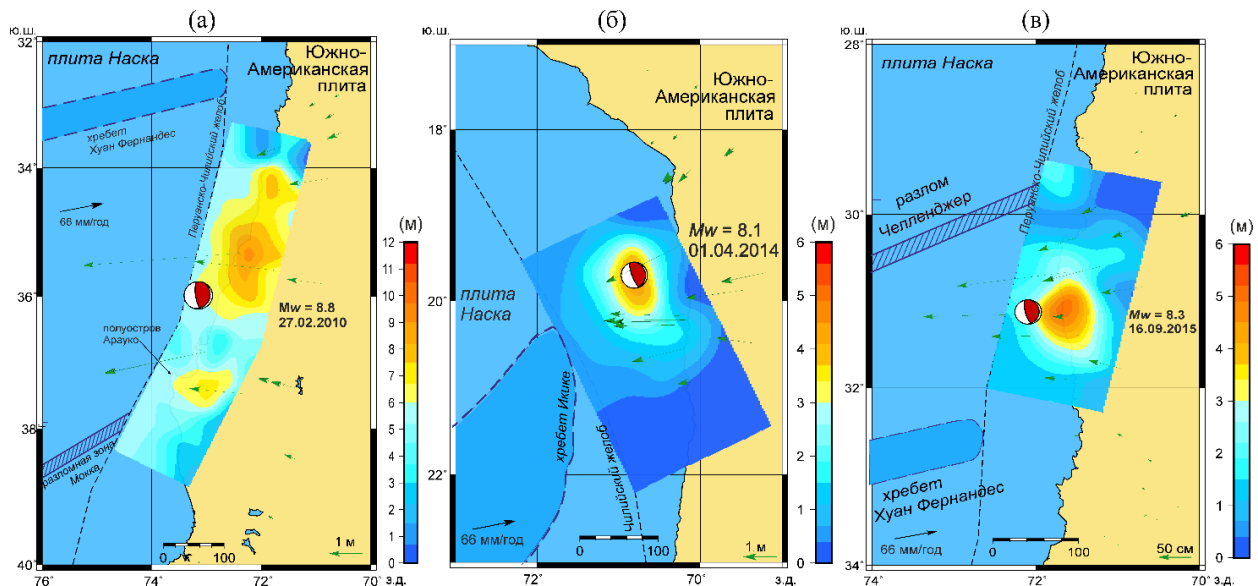


Рис. 1. Распределенная сейсмическая подвижка в очагах землетрясений: а) Мауле 2010 г.; б) Икике 2014 г.; в) Ильяпель 2015 г. Зелёные стрелки – мгновенные смещения на станциях во время землетрясения. Чёрная стрелка – вектор скорости субдукции

Кроме того, с использованием метода Шена [Shen et al., 1996] были рассчитаны поля скорости плоской деформации. Пример такого расчета – поле скорости плоской дилатации в районе очага землетрясения Икике 2014 г. – приведен на рис. 2. На основе результатов расчета в дальнейшем был проведен анализ пространственно-временных вариаций деформаций земной поверхности в окрестности очагов землетрясений Мауле 2010 г., Икике 2014 г. и Ильяпель 2015 г. в предсейсмический и постсейсмический периоды.

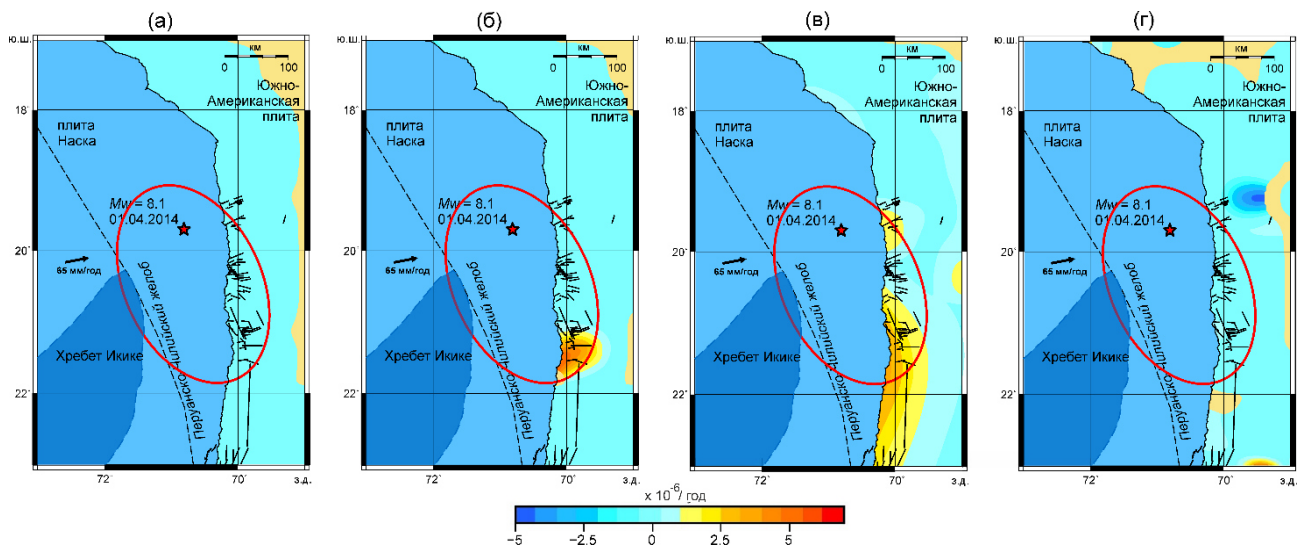


Рис. 2. Поле скорости плоской дилатации, полученное по данным спутниковых геодезических наблюдений для интервалов: (а) март 2012 г. – март 2013 г.; (б) март 2013 г. – март 2014 г.; (в) апрель 2014 г. – сентябрь 2015 г.; (г) сентябрь 2015 г. – сентябрь 2016 г. Красная звезда – эпицентр землетрясения Икике 2014 г., красный эллипс – контур очага

Дополнительно был выполнен анализ пространственного и временного распределения афтершоков, сопровождавших исследуемые землетрясения, в ходе которого были выявлены существенные различия рассматриваемых афтершоковых последовательностей. Также было изучено влияние крупных геологических структур и региональных разломов на процессы накопления и высвобождения напряжений. Показано, что геоморфологические структуры оказывают непосредственное влияние на процессы накопления и высвобождения напряжений во время сильнейших субдукционных землетрясений.

Литература

- Pollitz F.F. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // Geophysical Journal International. 1996. V. 125. № 1. P. 1–14. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x)
- Shen Z.-K., Jackson D.D., Ge B.X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements // Geophysical Journal International. 1996. V. 101. № B12. P. 27957–27980. DOI: [10.1029/96JB02544](https://doi.org/10.1029/96JB02544)

EVOLUTION OF THE SEISMIC PROCESS IN THE CHILEAN SUBDUCTION ZONE IN THE EARLY 21ST CENTURY BASED ON SATELLITE GEODETIC OBSERVATIONS

Shcheveva N.S.¹, Vladimirova I.S.^{1,2}

¹ Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow

² Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Moscow

E-mail: shchevyeva.ns@ocean.ru



СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

22–23 октября 2025 года
ИТПЗ РАН, Москва

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

22 октября (среда)

09:00	Регистрация участников (Музей ИКИ РАН)
10:00	Открытие (Музей ИКИ РАН)
Пленарная сессия Конвинер – чл.-к. Шебалин П.Н. (Музей ИКИ РАН)	
10:30	ак. Лобковский Л.И. (ИО им. П.П. Ширинова РАН), Баранов А.А. (ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН), Бобров А.М. (ИФЗ РАН) Современная глобальная геодинамика с позиций 3D-модели конвекции в мантии Земли и ее приложения к региональным тектоническим процессам
11:00	Стеблов Г.М. (ИТПЗ РАН) Спутниковая геодезия в разномасштабных задачах геодинамики
11:30	Кофе (Музей ИКИ РАН)
Оценка сейсмической опасности и других природных рисков Конвинер – Некрасова А.К. (Музей ИКИ РАН)	
11:45	Кособоков В.Г. (ИТПЗ РАН, Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, International Seismic Safety Organization), Некрасова А.К. (ИТПЗ РАН) Мифы о землетрясениях: Камо грядеши?
12:00	Смирнов В.Б. (МГУ имени М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН, КФ ФИЦ ЕГС РАН), Черепанцев А.С. (КФ ФИЦ ЕГС РАН, Южный федеральный университет), Пономарев А.В. (ИФЗ РАН), Патонин А.В. (ИФЗ РАН, Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН) О связи наклона графика повторяемости и фрактальной размерности в пространствах разной размерности по данным компьютерного и лабораторного моделирования
12:15	Некрасова А.К. , Горшков А.И. (ИТПЗ РАН), Кособоков В.Г. (ИТПЗ РАН, Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL) Синергия независимых методов для мониторинга сейсмического режима

12:30	Сенцов А.А. (ИФЗ РАН), Агибалов А.О. (ИФЗ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова) Формализация метода выделения зон возникновения очагов землетрясений: новый подход и результаты
12:45	Родкин М.В. (ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН) О прогнозе землетрясений на основе комплекса типичных предвестниковых аномалий, текущие результаты, трудности
13:00	Докукин П.А. (РУДН им. Патриса Лумумбы), Кафтан В.И. (ГЦ РАН) Применение синоптических анимаций для прогноза мест сильных землетрясений по данным ГНСС наблюдений
13:15-14:30	Обед
Оценка сейсмической опасности и других природных рисков Конвинер – Сенцов А.А. (Музей ИКИ РАН)	
14:30	Турунтаев С.Б. (ИДГ РАН, МФТИ), Рига В.Ю. (ИДГ РАН, ВНИИА), Зенченко Е.В. (ИДГ РАН) Лабораторное и численное моделирование сейсмичности, возникающей при закачке жидкости
14:45	Моторин А.Ю. , Баранов С.В. (КоФ ФИЦ ЕГС РАН) Автоматизированная оценка опасности афтершоков индуцированной сейсмичности Хибинского массива
15:00	Кафтан В.И. (ГЦ РАН), Мельников А.Ю., Докукин П.А. (РУДН им. Патриса Лумумбы) Оценка опасности возникновения мегаземлетрясения в районе желоба Нанкай (Япония) по данным ГНСС-наблюдений
15:15	Петрушов А.А. , Смирнов В.Б. (МГУ имени М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН) Влияние алгоритмических настроек на оценки параметров сейсмичности
15:30	Козлова И.А. , Бирюлин С.В., Юрков А.К. (ИГФ УрО РАН) Радоновый мониторинг в краткосрочном прогнозе времени и места землетрясения
15:45	Баранов А.А. (ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН), ак. Лобковский Л.И. (ИО им. П.П. Шишова РАН), Чуваев А.В. (МИРЭА), Бобров А.М. (ИФЗ РАН) Численная модель современной Земли – моделирование плитной тектоники для Северной Евразии
16:00	Кофе (Музей ИКИ РАН)
Оценка сейсмической опасности и других природных рисков Конвинер – Ливинский А.И. (Музей ИКИ РАН)	
16:15	Шнирман М.Г. , Елаева М.С., Блантер Е.М. (ИТПЗ РАН) О способах использования прогноза событий при решении обратных задач
16:30	Ливинский А.И. , Горшков А.И. (ИТПЗ РАН) Использование параметра фрактальности рельефа в задачах распознавания рудоносных узлов
16:45	Зарубина А.И. , Строгов Т.А., Большакова А.В. (МГУ имени М.В. Ломоносова), Колесов С.В., Носов М.А. (МГУ имени М.В. Ломоносова, ИМГиГ ДВО РАН) Определение области применимости уравнений мелкой воды для численного воспроизведения диспергирующих волн цунами на примере событий Тихоокеанского региона

17:00	Фролова Н.И. (ИГЭ РАН), Габсатарова И.П. (ФИЦ ЕГС РАН), Суцев С.П., Угаров А.Н. (МГТУ им. Баумана), Малаева Н.С. (ИГЭ РАН, ВНИИ ГОЧС (ФЦ)) Моделирование последствий сценарных землетрясений на примере городов Краснодарского края
17:15	Мазова Р.Х. (НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ИО им. П.П. Шишова РАН), Артемьев А.Д., Denisov E.F. (НГТУ им. Р.Е. Алексеева), Баранов А.А. (ИТПЗ РАН), Van Den Bosch J.F. (University of Antofagasta) Катастрофические волны цунами при возможном обрушении фронтального края ледника Туэйтса
17:30-18:30	<i>Дискуссия по докладам первого дня (Музей ИКИ РАН)</i>
Геодинамика Конвинер – Владимирова И.С. <i>(Семинарская 200)</i>	
11:45	Игнатъев Д.А. (ИО им. П.П. Шишова РАН), Владимирова И.С. (ИО им. П.П. Шишова РАН, ИТПЗ РАН) Применение машинного обучения для определения геометрии очагов субдукционных землетрясений
12:00	Филиппова А.И. (ИТПЗ РАН, ИЗМИРАН), Фомочкина А.С. (ИТПЗ РАН, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина), Владимирова И.С. (ИТПЗ РАН, ИО им. П.П. Шишова РАН), Габсатаров Ю.В. (ИО им. П.П. Шишова РАН, ФИЦ ЕГС РАН), Цуканова Е.С., Медведев И.П. (ИО им. П.П. Шишова РАН) Модифицированная методика расчета смещений в очаге для оперативного прогнозирования цунами
12:15	Чинкин В.Е. , Остапчук А.А. (ИДГ РАН) Квази-колмогоровский режим фрагментации массива горных пород в зонах формирования очагов землетрясений
12:30	Щевьева Н.С. (ИО им. П.П. Шишова РАН), Владимирова И.С. (ИО им. П.П. Шишова РАН, ИТПЗ РАН) Эволюция сейсмического процесса в Чилийской зоне субдукции в начале XXI века по данным спутниковых геодезических наблюдений
12:45	Брикова С.А. , Гридчина М.С. (ППК «Роскадастр», ИТПЗ РАН), Басманов А.В. (ППК «Роскадастр») Геодинамический мониторинг Байкальской рифтовой зоны
13:00	Семка М.А. , Горшков А.И. (ИТПЗ РАН) Потенциальные места сильнейших землетрясений в Тихоокеанском поясе и Зондской дуге
13:15-14:30	<i>Обед</i>
Строение и состояние земных недр по геофизическим и сейсмологическим данным Конвинер – Гоев А.Г. <i>(Семинарская 200)</i>	
14:30	Гоев А.Г. (ИДГ РАН, ИФЗ РАН), Филиппова А.И. (ИЗМИРАН, ИТПЗ РАН), Орешин С.И. (ИФЗ РАН) Скоростное строение земной коры и верхней мантии под восточной частью Хараулахтского сегмента Верхоянской сеймотектонической зоны по данным функций приемника и поверхностных волн
14:45	Бобров А.М. (ИФЗ РАН), ак. Лобковский Л.И. (ИО им. П.П. Шишова РАН), Баранов А.А. (ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН) Строение мантии: анализ сечений трехмерной численной модели

15:00	Сычева Н.А. (ИФЗ РАН), Богомолов Л.М. (ИМГиГ ДВО РАН) Распределение сброшенных напряжений в Алтае-Саянском сейсмоактивном регионе
15:15	Назарова Л.А. , Назаров Л.А. (ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН) Связь техногенной сейсмичности и вариации полей напряжений по данным лабораторных экспериментов и натурных наблюдений
15:30	Гридчина М.С. (ИТПЗ РАН, ППК «Роскадастр»), Стеблов Г.М. (ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН) Активные разломы Дальнего Востока. Новые данные
15:45	Подольская Е.С. (ИТПЗ РАН, НИУ ВШЭ), Некрасова А.К., Прохорова Т.В., Селюцкая О.В., Трубенков А.В. (ИТПЗ РАН) Актуальный российский научный опыт использования веб-геоинформационных систем в сейсмологии
16:00	Кофе (Музей ИКИ РАН)
Сейсмичность и очаг землетрясения Конвинер – Морозов А.Н. (Семинарская 200)	
16:15	Морозов А.Н. (ИФЗ РАН, ГЦ РАН, ФИЦКИА УрО РАН), Ваганова Н.В. (ФИЦКИА УрО РАН), Асминг В.Э., Фёдоров И.С. (КоФ ФИЦ ЕГС РАН) Сейсмичность восточного сектора Российской Арктики за инструментальный период наблюдений
16:30	Андреева Н.В. (ИФЗ РАН), Баранов А.А. (ИТПЗ РАН) Сейсмичность Антарктиды и Южного океана
16:45	Богомолов Л.М. , Сычев В.Н. (ИМГиГ ДВО РАН) Динамические параметры очагов землетрясений, произошедших на острове Сахалин в 1978–2024 гг.
17:00	Виноградов Ю.А. (ФИЦ ЕГС РАН), Китов И.О. (ИДГ РАН), Санина И.А. (ИДГ РАН), Соколова И.Н. (ФИЦ ЕГС РАН) Сейсмическая эмиссия на испытательном полигоне Пхунгери в КНДР продолжается в 2025 году
17:15	Греков Е.М. (ИТПЗ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова) Анализ группирования землетрясений в процессе интрузий перед извержениями вулканов Августина и Редаут
17:30-18:30	Дискуссия по докладам первого дня (Семинарская 200)

23 октября (четверг)

Пленарная сессия Конвинер – чл.-к. Шебалин П.Н. <i>(Музей ИКИ РАН)</i>	
09:00	Чебров Д.В. (КФ ФИЦ ЕГС РАН) Камчатское мегаземлетрясение 29 июля 2025 г. ($M_w = 8.8$). Предварительные результаты обработки данных региональной системы мониторинга
09:30	Кочарян Г.Г., Беседина А.Н., Остапчук А.А. (ИДГ РАН) Использование представлений геомеханики разломных зон при решении задач сейсмологии
10:00	ак. Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А. (ИФЗ РАН), Конвисар А.М., Смирнов В.Б. (ИФЗ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова), Титков Н.Н., Чебров Д.В. (КФ ФИЦ ЕГС РАН) Модель поверхности разрыва землетрясения на Камчатке 29.07.2025 $M 8.8$ по данным спутниковой геодезии и интерферометрии
10:30	Кофе <i>(Музей ИКИ РАН)</i>
Камчатское землетрясение Конвинер – Чебров Д.В. <i>(Музей ИКИ РАН)</i>	
10:45	ак. Лобковский Л.И., Владимирова И.С. (ИО им. П.П. Шишова РАН, ИТПЗ РАН), Гарагаш И.А. (ИФЗ РАН), чл.-к. Шебалин П.Н. (ИТПЗ РАН) К вопросу об аномально коротком промежутке времени между очагами мегаземлетрясений 30.07.2025 и 05.11.1952 в Курило-Камчатской зоне субдукции
11:00	Филиппова А.И. (ИТПЗ РАН, ИЗМИРАН), Фомочкина А.С. (ИТПЗ РАН, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина) Очаговые параметры сильных Камчатских землетрясений 2025 г. ($M_w > 7.0$) по телесейсмическим данным
11:15	Владимирова И.С. (ИТПЗ РАН, ИО им. П.П. Шишова РАН, ФИЦ ЕГС РАН), Габсатаров Ю.В. (ИО им. П.П. Шишова РАН, КФ ФИЦ ЕГС РАН), Цуканова Е.С., Медведев И.П. (ИО им. П.П. Шишова РАН), Сдельникова И.А. (ФИЦ ЕГС РАН), Титков Н.Н. (КФ ФИЦ ЕГС РАН) Моделирование очага Камчатского землетрясения 30 июля 2025 г. и связанного с ним цунами
11:30	Скоркина А.А. (ИТПЗ РАН), Молокова А.П. (ИТПЗ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова), Чебров Д.В., Шубина И.Ю. (КФ ФИЦ ЕГС РАН) Очаговые функции и их спектры для Камчатского землетрясения ($M = 8.8$)
11:45	Гитис В.Г., Дерендяев А.Б. (ИППИ РАН) Систематический прогноз землетрясений Камчатки
12:00	Гаврилов В.А., Полтавцева Е.В. (ИВиС ДВО РАН, КамГУ им. Витуса Беринга), Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В. (ИВиС ДВО РАН), Сагарьяров И.А., Федористов О.В. (ИВиС ДВО РАН, КамГУ им. Витуса Беринга) Многолетний комплексный геофизический мониторинг процессов подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива (Камчатка). Опыт средне- и краткосрочного прогнозирования сейсмической опасности
12:15-13:30	Обед

Методы математической геофизики Конвинер – Желиговский В.А. <i>(Музей ИКИ РАН)</i>	
13:30	Желиговский В.А. (ИТПЗ РАН) Оценка скорости роста палинстрофии в двумерной идеальной гидродинамике: опыт подхода на основе вычислительного эксперимента
13:45	Подвигина О.М. (ИТПЗ РАН) Устойчивость конвективных валов в горизонтальном слое, вращающемся относительно наклонной оси
14:00	Хасаева Т.Т. (МГУ имени М.В. Ломоносова, ИТПЗ РАН) Решение спектральной задачи генерации магнитного поля во внешних областях галактики с учетом расширения галактического диска
14:15	Михайлов Е.А. (ФИАН им. П.Н. Лебедева, МГУ имени М.В. Ломоносова) Колебания при насыщении роста магнитного поля в теории динамо
14:30	Толмачев Д.С. (ИТПЗ РАН) Численное моделирование магнитного динамо во вращающейся электропроводной жидкости с наклонной осью
14:45	Таранюк А.А. (ИТПЗ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова) Адвекция скалярной примеси двумерным течением с пространственно квазипериодическим полем скорости
15:00	Кофе <i>(Музей ИКИ РАН)</i>
Геофизические эффекты, связанные с землетрясениями Конвинер – Фомочкина А.С. <i>(Музей ИКИ РАН)</i>	
15:15	Любушин А.А., Родионов Е.А. (ИФЗ РАН) Влияние солнечных вспышек на выделение сейсмической энергии в Тихоокеанском огненном кольце
15:30	Зинкин Д.В., Пилипенко В.А. (ИФЗ РАН) Вызывают ли солнечные вспышки и межпланетные ударные волны землетрясения?
15:45	Липеровская Е.В. (ИФЗ РАН), Родкин М.В. (ИТПЗ РАН, ИМГиГ ДВО РАН) Статистика сейсмоионосферных эффектов в F-области ионосферы для разноглубинных землетрясений: дополнительные данные для интерпретации
16:00	Новиков В.А. (ОИВТ РАН), Лазарева Е.А. (ИС РАН) Отклик сейсмичности в очаговой зоне сильных землетрясений ($M \geq 7$) Северной Калифорнии на динамические и электромагнитные воздействия как возможный индикатор напряженно-деформированного состояния земной коры
16:15	Григорян А.Г., Канониди К.Х. (ИФЗ РАН) К вопросу о выявлении аномалий электромагнитной индукции в земной коре и их возможная связь с подготовкой сильных землетрясений
16:30-17:00	Дискуссия по докладам второго дня <i>(Музей ИКИ РАН)</i>

Распределенное акустическое зондирование в геофизике Конвинер – Спиридонов Е.П. <i>(Семинарская 200)</i>	
13:30	Харасов Д.Р., Трещиков В.Н. (ООО «Т8»), Наний О.Е. (ООО «Т8», МГУ имени М.В. Ломоносова) Распределённые акустические датчики (DAS) компании Т8 для геофизики и сейсмологии. Примеры применения и методы увеличения дальности работы
13:45	Пономарев И.С., Наний О.Е. (ООО «Т8», МГУ имени М.В. Ломоносова), Фомиряков Э.А., Харасов Д.Р., Трещиков В.Н. (ООО «Т8») Влияние геометрии кабеля на сигнал DAS в сейморазведке
14:00	Ашкар Г.Х., Харасов Д.Р., Спиридонов Е.П. (ООО «Т8») Способы агрегации данных DAS для повышения устойчивости результатов
14:15	Спиридонов Е.П. (ООО «Т8»), Кислов К.В. (ИТПЗ РАН), Харасов Д.Р., Старовойт Ю.О., Трещиков В.Н. (ООО «Т8») Сейсмофотоника: пассивное измерение дисперсии поверхностных волн с помощью DAS «Дунай»
14:30	Белов М.В., Потемка А.К., Токарев М.Ю. (ООО «ЦАСД-МГУ»), Симикин Д.Е., Горшков Б.Г. (ООО «Петрофайбер») Регистрация микросейсмических событий с использованием ПАК «FORseis» на базе распределенного акустического зондирования
14:45	Гравиров В.В. (ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН) Отдельные вопросы разработки многоканальной прецизионной температурной антенны
15:00	Кофе <i>(Музей ИКИ РАН)</i>
Методы получения и обработки сейсмологических данных Конвинер – Филиппова А.И. <i>(Семинарская 200)</i>	
15:15	Гоев А.Г. (ИДГ РАН, ИФЗ РАН), Резниченко Р.А. (ИДГ РАН) Новая широкополосная сейсмическая сеть на Восточно-Европейской платформе
15:30	Алёшин И.М. (ИФЗ РАН) Петрофизика приповерхностных пород, выведенная из приёмных функций
15:45	Крылов А.А. (ИО им. П.П. Шишова РАН, НТУ «Сириус») Особенности применения инструментальных и расчетных методов при оценке сейсмической опасности морских регионов
16:00	Новиков М.А., Крылов А.А. (ИО им. П.П. Шишова РАН) Кластеризация сейсмичности в окрестности Оленекской протоки (дельта р. Лены)
16:15	Дергач П.А., Абраменков С.С. (ИНГГ СО РАН, НГУ), Дробчик А.Н. (ИНГГ СО РАН) Результаты тестирования широкополосного сейсмометра на основе современных геофонов и цифровой частотной коррекции
16:30-17:00	<i>Дискуссия по докладам второго дня</i> <i>(Семинарская 200)</i>

23 октября (четверг) 17:00-18:00

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ Конвинер – Кержаев А.П. <i>(Музей ИКИ РАН)</i>	
Бергаль-Кувикас О.В. (ИВиС ДВО РАН, КамГУ им. Витуса Беринга), Павлова В.Ю. (КамГУ им. Витуса Беринга), Акбашев Р.Р. (КамГУ им. Витуса Беринга, КФ ФИЦ ЕГС РАН), Макаров Е.О. (КНС им. Т.И. Вяземского) Приуроченность шлакового конуса на Халактырском пляже к разрывным нарушениям в Малко-Петропавловской зоне поперечных дислокаций (Центральная Камчатка)	
Вдовин В.С., Рублев А.С. (ИТПЗ РАН) Оценка смещений постоянно действующих станций ГНСС в зоне землетрясений на Камчатке 30.07.2025 и 18.09.2025	
Гравиров В.В. (ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН), Першин С.М. (ИОФ им. А.М. Прохорова РАН) Влияние сильных турецких землетрясений 2023 года на температурно-флюидный режим в штольне Баксанской нейтринной обсерватории	
Гравиров В.В. (ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН) Достоинства и недостатки виртуальных геофизических приборов, базирующихся на технологии распределенного акустического зондирования, по сравнению с классическими сейсмическими приборами	
Гравиров В.В. (ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН), Кислов К.В. (ИТПЗ РАН) Выбор наилучшего способа прецизионных измерений температуры горной породы	
Кислов К.В. (ИТПЗ РАН), Гравиров В.В. (ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН) Какие помехи наиболее опасны для DAS	
Кислов К.В. (ИТПЗ РАН), Марченков А.Ю. (МГУ имени М.В. Ломоносова) Генерация искусственного сейсмического сигнала: подготовка маломощных импульсных источников для сравнительных экспериментов	
Кревсун Д.А. (ИТПЗ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова), Некрасова А.К., Прохорова Т.В. (ИТПЗ РАН) ГИС-проект для оценки сейсмической опасности на основе Общего закона подобия для землетрясений: Прибайкалье	
Алёшина Е.И., Карпенко Л.И., Курткин С.В. , Габдрахманова Ю.В. (МФ ФИЦ ЕГС РАН) Омогонские землетрясения 2021–2023 гг.: новые данные о сейсмичности Северо-Востока России	
Новикова О.В. , Горшков А.И., Семка М.А., Ливинский А.И. (ИТПЗ РАН) Распознавание мест возможного возникновения землетрясений (M6+) на Сахалине	
Радзиминович Я.Б. (БФ ФИЦ ЕГС РАН, ИТПЗ РАН), Гилёва Н.А. (БФ ФИЦ ЕГС РАН), Филиппова А.И. (ИТПЗ РАН, ИЗМИРАН), Мельникова В.И. (ИЗК СО РАН) Хубсугульское землетрясение 11 января 2021 г.: анализ макросейсмических данных	
Рыжак Е.И. , Синюхина С.В. (ИФЗ РАН) Развитие неустойчивости в аномально стратифицированных вязкоупругих геосистемах: иллюстрация закономерностей на одномерных моделях	
Сычева Н.А. (ИФЗ РАН) Динамические параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона. Сравнение ДП землетрясений двух сейсмоактивных регионов: Крымско-Черноморский и Северный Тянь-Шань	
Федорова М.Г. , Крушельницкий К.В. (ИТПЗ РАН) Возникновение удаленных афтершоков перед сильными землетрясениями	
Филиппова А.И. (ИТПЗ РАН, ИЗМИРАН), Фомочкина А.С. (ИТПЗ РАН, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина), Кислов К.В., Винберг Ф.Э. (ИТПЗ РАН) Методы определения механизма очага землетрясения по данным DAS: обзор	
18:00	Дружественный фуршет

Научное издание

IV Всероссийская научная конференция

Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений

ИТПЗ РАН, 22–23 октября 2025 г., Москва, Россия

Материалы докладов и программа конференции

Ответственные редакторы:

к.ф.-м.н. И.С. Владимирова, к.ф.-м.н. А.И. Филиппова

Компьютерная верстка:

О.А. Мациевская, Т.В. Прохорова

Дизайн обложки:

А.П. Молокова

Оригинал-макет подготовлен в ИТПЗ РАН

117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

Москва-2025