

УДК 550.34

Сейсмический момент локальных землетрясений центральной части Байкальского рифта методом инверсии огибающей коды

© 2024 г. П.А. Предеин^{1,2}, М.А. Хритова^{3,4}

¹ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия; ²БуФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Улан-Удэ, Россия;
³БФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия; ⁴ИЗК СО РАН, г. Иркутск, Россия

Поступила в редакцию 25.06.2024 г.

Аннотация. Рассмотрено определение свойств источника излучения, величины скалярного сейсмического момента M_0 землетрясений, с использованием метода инверсии огибающей коды. В октавных диапазонах с центральными частотами от 0.53 до 34 Гц оценено относительное локальное усиление в районе приёмника и потери сейсмической энергии на поглощение и рассеяние в среде. Использованы записи землетрясений, зарегистрированных в центральной части Байкальского рифта тремя сейсмическими станциями на эпицентральных расстояниях 40–120 км. Рассчитанное затухание и локальное усиление использовано для оценки сейсмического момента и моментных магнитуд M_w землетрясений исследуемой области. Получено хорошее соответствие между M_w по коде и магнитудой, пересчитанной по формуле Т.Г. Раутиан из величины энергетического класса. Таким образом, разность между этими величинами близка к постоянной в предельном диапазоне магнитуд. Показано, что упрощённая модель рассеяния поперечных волн может применяться для энергетической классификации и определения очаговых параметров слабых и умеренных землетрясений, регистрируемых с хорошим соотношением сигнал/шум только на локальных расстояниях.

Ключевые слова: инверсия, огибающая, кода, поглощение, рассеяние, сейсмический момент, магнитуда.

Для цитирования: Предеин П.А., Хритова М.А. Сейсмический момент локальных землетрясений центральной части Байкальского рифта методом инверсии огибающей коды // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 3. – С. 40–59. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.3.03>. – EDN: TGCUME

Введение

Оценка энергии, выделившейся в очаге землетрясения, является актуальной задачей сетей сейсмического мониторинга разного уровня иерархии [Землетрясения ..., 2007]. Определение параметров источника осложнено тем, что исходными данными являются измеренные колебания вблизи дневной поверхности на значительном, как правило, удалении от эпицентра. Волновые формы записи землетрясения зависят от свойств источника излучения, среды распространения сейсмических волн и локальных условий в районе станции-приёмника [Bormann, 2012]. Следовательно, надёжность определения параметров очага зависит от точности моделирования потерь сейсмической энергии в среде и приповерхностных локальных эффектов. Среду

можно рассматривать как преобразователь очагового излучения [Экспериментальные ..., 1981], своего рода фильтр, который с увеличением расстояния сильнее подавляет короткопериодные колебания, по сравнению с низкочастотными [Кондратьев, 1976]. Общие потери сейсмической энергии в среде включают упругие эффекты геометрического расхождения и рассеяния, связанные с перераспределением сейсмической энергии, и неупругое поглощение, т.е. собственные потери.

На случайных неоднородностях литосферы возникают многочисленные нерегулярные волны, которые, накладываясь на очаговое излучение, превращают исходный сигнал в продолжительный колебательный процесс. Именно с механизмом рассеяния поперечных волн связано формирование коды [Aki, 1969]. Из-за

многократного осреднения на неоднородностях в объёме среды, кода, в отличие от прямых волн, практически нечувствительна к влиянию диаграммы направленности очагового излучения [Aki, Chouet, 1975]. В фиксированных частотных диапазонах огибающей коды региональных землетрясений свойственна стабильность спада её амплитуд во временной области [Экспериментальные ..., 1981]. Благодаря этому свойству, анализ кода-волн стал популярным инструментом статистического изучения параметров среды [Aki, Chouet, 1975; Abubakirov, Gusev, 1990; Mitchell et al., 2008]. При этом важную информацию дают методы, позволяющие отдельно оценить рассеяние на неоднородностях литосферы и её поглощающие свойства.

Для прогноза сейсмической опасности важно учитывать эффект рассеяния, заключающийся в увеличении общей продолжительности колебаний при снижении пиковых амплитуд [Boore, 2003], т.к. в силу закона сохранения энергии происходит её перераспределение в пространстве [Sato et al., 2012]. Известно также, что влияние неупругого поглощения заключается в потере энергии при распространении сейсмических волн в среде, т.е. с увеличением расстояния, и, соответственно, времени пробега [Bormann, 2012]. Оценить вклад отдельных компонент в общее затухание позволяет анализ волновых форм во временной области, а именно продолжительной части записи землетрясения, огибающей коды. Экспоненциальное поглощение приводит к убыванию амплитуд кода-волн, при этом наклон огибающей даёт количественную оценку собственных потерь. Характеристикой интенсивности рассеяния является соотношение энергии нерассеянных (прямых) волн и коды, т.к. многократно рассеянная на неоднородностях среды энергия будет наблюдаться на сейсмограмме позднее основных цугов поперечных волн, рассеянных на малые углы [Gusev, Guseva, 2016].

Впервые анализ огибающей коды для оценки компонент затухания использовался в методе кратных окон (Multiple Lapse Time Window Analysis, MLTWA) [Fehler et al., 1992]. Позднее для моделирования многократного рассеяния сейсмической энергии было адаптировано решение теории переноса излучения, изначально разработанное для электромагнитных волн [Margerin et al., 2000; Sato et al., 2012]. Для оценки отдельных компонент затухания и величины сейсмического момента в работе [Sens-Schönfelder, Wegler, 2006] была предложена модель инверсии огибающей коды. В данной работе используется

модифицированный метод инверсии [Eulenfeld, Wegler, 2016], алгоритм которого реализован в свободно распространяемом программном пакете Qopen [Separation ..., 2024].

Метод основан на моделировании энергии прямой волны и огибающей коды функцией Грина для случая многократного изотропного рассеяния в трёхмерном полупространстве, однородном по поглощению. Несмотря на то, что в реальных средах эти предположения могут не выполняться, результат моделирования [Gaebler et al., 2015] показал сопоставимость оценок для среды изотропного рассеяния с полученными на основе более сложного моделирования упругой теории переноса излучения в условиях анизотропного рассеяния. Также в работе [Heller et al., 2022] показано, что гипотеза об изотропном рассеянии выполняется в упругом полупространстве, но изотропия систематически нарушается, и соотношение энергии смещается от продольных волн в пользу поперечных волн, поляризованных в вертикальной плоскости. Тем не менее, метод позволяет получить физически обоснованный результат благодаря тому, что форма анализируемой огибающей напрямую зависит от свойств рассеивающей среды. Метод инверсии огибающей коды использовался для оценки величин поглощения и рассеяния сейсмических волн для различных регионов [Gaebler et al., 2015; Eulenfeld, Wegler, 2016; 2017; Izgi et al., 2020; Eulenfeld et al., 2023].

В отличие от подхода [Mayeda et al., 2003], в котором параметры источника оцениваются с помощью эталонных событий, сейсмические моменты которых известны, и метода кратных окон (MLTWA), метод инверсии по умолчанию не использует нормировку к коде, позволяя дополнительно оценить очаговый спектр смещения и эффекты локального усиления в районе станции. Величину скалярного сейсмического момента, определяемого низкочастотным уровнем очагового спектра и связанного с физическими свойствами очага [Aki, Richards, 1980], можно преобразовать в оценку моментной магнитуды M_w [Hanks, Kanamori, 1979]. Метод инверсии огибающей использовался для расчёта моментных магнитуд и очаговых параметров для различных в тектоническом отношении регионов: области Восточно-Анатолийской зоны разломов [Eken, 2019], Западной Богемии [Eulenfeld et al., 2021], небольшой части территории Финского залива, Балтийского щита [Eulenfeld et al., 2023], где в детальном масштабе анализировались землетрясения с локальными магнитудами от 0 до 1.8.

На территории Байкальской рифтовой зоны сейсмологические наблюдения проводятся разреженной сетью наблюдений, расстояние между соседними станциями в среднем составляет около 100 км [Кобелева и др., 2022]. В центральной части рифта действует более уплотнённая сеть пунктов наблюдения. За последние два столетия в этой области произошло около двадцати сильнейших землетрясений, в т.ч. несколько катастрофических. Наиболее сильными землетрясениями, локализованными в районе, прилегающем к Селенгинской депрессии, являются максимальное по магнитуде Цаганское землетрясение 12 января 1862 г. ($MLH=7.5$) [Новый каталог ..., 1977], в результате которого произошло опускание тектонического блока земной коры и образование залива Провал, и Среднебайкальское 29 августа 1959 г. ($MLH=6.8$) [Солоненко, Тресков, 1960]. Землетрясение, произошедшее 9 декабря 2020 г. ($M_w=5.5$), получившее название Кударинского [Tubанov et al., 2022], стало сильнейшим в этой части рифтовой зоны за последние 60 лет.

В данной работе исследуются параметры поглощения и рассеяния сейсмических волн землетрясений, локализованных в районе Селенгинской депрессии. Свойства затухания используются для оценки величины скалярного сейсмического момента и моментных магнитуд землетрясений исследуемой территории. Для инверсии используются в том числе записи слабых и умеренных землетрясений, регистрируемых с хорошим соотношением сигнал/шум только на локальных расстояниях. Чтобы результат обработки был сравним с оценками, полученными другими авторами, подробно описываются используемые данные, методика и схема работы алгоритма инверсии огибающей.

Используемые данные

Для обработки использовались записи локальных землетрясений, зарегистрированные за период 2019–2022 гг. двумя станциями Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН («Хурамша» (HRMR)

и «Улан-Удэ» (UUDB)) и станцией Байкальского филиала «Тырган» (TRG) (таблица, рис. 1). На всех пунктах наблюдений установлены широкополосные сейсмометры, частота дискретизации записей составляет 100 Гц. Вследствие разного времени начала работы аппаратуры, набор данных для каждой станции различен. На станции «Хурамша» в феврале 2019 г. был установлен трёхканальный регистратор Nanometrics Centaur, работающий вместе с 30-секундным сейсмометром Guralp CMG-40T. Комплект оборудования Nanometrics развёрнут на станции «Улан-Удэ» в мае 2019 г., для станции «Тырган» имелись данные непрерывной регистрации, начиная со второй половины 2020 года. Для всех пунктов наблюдений имелся исходный материал для обработки за период с декабря 2020 г., когда регистрировались афтершоки Кударинского землетрясения 2020 г. [Tubанov et al., 2022], составившие значительную часть использованного каталога.

Для подготовки входных данных алгоритма инверсии использовались результаты сводной обработки Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН, содержащие информацию о времени и координатах очагов, рассчитанный энергетический класс, в том числе результат его определения по каждой станции, а также время вступлений прямых волн для каждой станции, зарегистрировавшей землетрясение.

Используемый каталог включал 84 землетрясения в области, прилегающей к Селенгинской депрессии, ограниченной координатами 106.1–107.0°N, 52.0–52.5°E (рис. 1а). Всего обработаны 152 записи землетрясений по трём станциям: наибольшее количество волновых форм получено по станции HRMR – 74, по материалам наблюдений UUDB отобрано 47 сейсмограмм, TRG – 31. Пункт наблюдения «Тырган» расположен ближе к очагам землетрясений, минимальное эпицентральное расстояние для этой станции составило около 40 км, максимальное эпицентральное удаление около 120 км – для станции «Улан-Удэ». Для ограниченного

Таблица. Сейсмические станции, данные которых использованы в обработке

Станция	Код	Координаты		Аппаратура	
		φ, °N	λ, °E	Регистратор	Сейсмометр
Хурамша	HRMR	51.63	106.96	Centaur-3	CMG-40T
Тырган	TRG	52.76	106.34	Centaur-3	TC120-SV1
Улан-Удэ	UUDB	51.87	107.66	Centaur-3	TC120-SV1

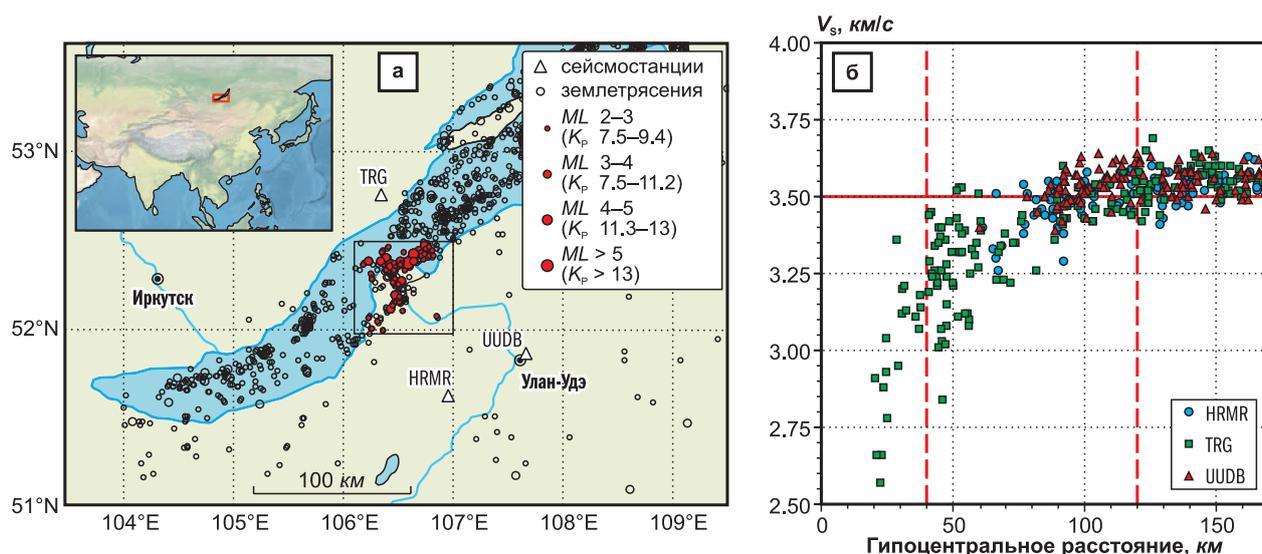


Рис. 1: а – схема расположения сейсмических станций и эпицентров землетрясений за 2019–2022 гг., красным цветом выделены использованные в расчёте очаги землетрясений; б – скорость прямой поперечной волны в зависимости от гипоцентрального расстояния для трёх использованных станций, показан диапазон расстояний (пунктирными линиями) и величина средней скорости S-волн, использованная в расчёте

диапазона эпицентральных расстояний, используемых в работе, рассматривается только энергия прямых Sg-волн, рассеянная в верхней части литосферы [Kennett, 2009].

Основной оценкой энергии землетрясения в региональных каталогах Прибайкалья и Забайкалья в настоящий момент является энергетический класс по Т.Г. Раутиан (K_p) [Раутиан, 1960]. Величина K_p определяется при детальной обработке Байкальским филиалом ФИЦ ЕГС РАН с точностью 0.2 единицы, однако её использование затрудняет сопоставление каталогов землетрясений, полученных для разных регионов [Петрова, Курова, 2023]. В данной работе в качестве эталонных использовались магнитуды, полученные пересчётом из величины энергетического класса K_p по формуле Т.Г. Раутиан [Раутиан, 1960; Rautian et al., 2007]:

$$M=(K_p-4)/1.8, K_p \leq 14. \quad (1)$$

Поскольку эта оценка ближе к локальной магнитуде, для $M \leq 5$ [Петрова, Курова, 2023] использовалось обозначение ML для магнитуды, пересчитанной из величины K_p . Для обработки использовались землетрясения с энергетическим классом, начиная с $K_p \geq 7.5$, что соответствует минимальной магнитуде ML в каталоге 1.9. Максимальная магнитуда Кударинского землетрясения ($M=5.5$) [Tubanov et al., 2022], соответствует энергетическому классу $K_p=14$.

Следует отметить качество исходных данных, использованных в обработке. На всех трёх станциях установлена аппаратура с низким уровнем собственного шума, высокой точностью временной привязки и большим динамическим диапазоном (таблица). Для проверки на идентичность и сравнения записей на сейсмостанции «Хурамша» в июле 2020 г. устанавливался комплект оборудования Nanometrics (120-секундный сейсмометр Trillium Compact с регистратором Centaur-3). По записям сильных землетрясений, зарегистрированных на телесеизмических расстояниях, методом сравнения с эталоном [Pavlis, Vernon, 1994] была рассчитана общая чувствительность сейсмометрических каналов и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) 30-секундного сейсмометра Guralp CMG-40T с погрешностью не более 3–5%.

Перед обработкой проводилась предварительная отбраковка записей, в которых наблюдались наложения на шлейфовую часть сейсмограммы сигнала от другого землетрясения, либо помех. В процессе обработки дополнительно проверялось искажение сигнала в высокочастотной области с помощью визуального анализа отфильтрованных волновых форм на графических файлах программы обработки. Кроме того, из расчёта параметров затухания удалялись записи, произошедшие на фоне коды сильных землетрясений, например, через 5 мин после основного толчка Кударинского землетрясения,

и через 10 мин после его сильнейшего афтершока 10 декабря в 14:20:02.

Расчёты проводились в частотных полосах, использовался фильтр Баттерворта 4-й степени с нулевым фазовым сдвигом. Фильтрация исходного сигнала проводилась в октавных диапазонах с перекрытием 50%, для обработки использовались центральные частоты 0.53, 0.75, 1, 1.5, 2.1, 3.0, 4.2, 6.0, 8.5, 12, 17, 24 и 34 Гц. Перед процедурой фильтрации вносилась полная поправка на АЧХ сейсмометрических каналов, а не только на общую чувствительность регистрирующего тракта. При этом полезный сигнал, т.е. истинные амплитуды скорости смещения, восстанавливались в полосе от 10 с до 40 Гц.

Метод инверсии огибающей сейсмической коды

В этом разделе рассматриваются основные аспекты работы алгоритма, необходимые для практического применения метода инверсии огибающей. Более подробное изложение адаптации теории переноса излучения для рассеяния сейсмической энергии и деталей реализации алгоритма приведено в работах [Sens-Schönfelder, Wegler, 2006; Eulenfeld, Wegler, 2016; Eulenfeld, Wegler, 2017; Eulenfeld et al., 2021; Eulenfeld et al., 2023].

Решение обратной геофизической задачи – инверсии, – заключается в моделировании свойств среды на основе данных сейсмических наблюдений рассеянного волнового поля. Суть алгоритма заключается в минимизации невязки между теоретической и наблюдаемой на сейсмограмме плотностью энергии огибающей в фиксированных частотных диапазонах. Для обработки используется участок записи начиная от времени вступления поперечной волны. Теория переноса излучения не позволяет моделировать полную волновую форму сигнала. Вместо этого энергия, рассеянная на малые углы, оценивается как среднее значение в окне обработки прямой волны, за которым следует анализируемый участок кода-волн, для которого моделируется спад энергии огибающей.

Для получения наблюдаемой огибающей используются каналы скорости смещения v_c и их Гильберт-преобразование $H(v_c)$ [Sato et al., 2012]. Из-за постоянной разности фаз $\pm\pi/2$ между спектральными составляющими исходного сигнала и его преобразованием Гильберта, полученная огибающая представляет собой касательную к максимумам исходного сигнала. Наблюдаемая энергия $E_{\text{наб}}$ вычисляется [Eulenfeld, Wegler, 2016]

в частотном диапазоне с шириной полосы пропускания в зависимости от степени фильтра Δf , для средней плотности пород ρ_0 и коэффициента свободной поверхности C :

$$E_{\text{наб}}(t,r) = \frac{\rho_0 \sum_{c=1}^3 (v_c(t,r)^2 + H(v_c(t,r))^2)}{2C \cdot \Delta f}. \quad (2)$$

Поскольку кода-волны рассеяны в разных направлениях на случайных неоднородностях между источником и приёмником, нет принципиальной разницы между используемыми каналами [Havskov et al., 2016]. Алгоритм позволяет выбрать для обработки произвольный канал сейсмической записи, однако для стабильности огибающей в данной работе использовались все три ортогональные компоненты.

Теоретическая огибающая моделирует плотность энергии на гипоцентральной расстоянии r от точечного источника излучения W (единица измерения Дж/Гц) с учётом величины локального усиления приёмника R , функции Грина нескольких переменных G и экспоненциального затухания во временной области t , зависящего от коэффициента поглощения b (единица измерения c^{-1}) [Sens-Schonfelder, Wegler, 2006]. Наблюдаемая огибающая $E_{\text{наб}}$ сравнивается с моделируемой энергией $E_{\text{мод}}$, которая помимо коэффициента рассеяния g (единица измерения км^{-1}), учитывает также величину геометрического расхождения на расстоянии r :

$$E_{\text{мод}}(t,r) = W \cdot R \cdot G(t,r,g) \cdot e^{-bt}. \quad (3)$$

Результат подбора энергии группы S -волн и теоретической огибающей коды к наблюдаемой в частотном диапазоне 2–4 Гц для землетрясения с $ML=3.7$ на станциях «Хурамша» (HRMR) и «Улан-Удэ» (UUDB) на гипоцентральных расстояниях соответственно 100 и 115 км, показан на рис. 2.

Рассчитываемые значения коэффициентов поглощения b и рассеяния g пропорциональны величинам затухания вследствие собственного поглощения (Q_i^{-1}), и рассеяния на неоднородностях среды (Q_{sc}^{-1}). Сумма отдельных компонент характеризует общие потери сейсмической энергии (Q_T^{-1}) в среде, так же как величина средней скорости поперечных волн v_0 характеризует её интегральные кинематические характеристики:

$$Q_i^{-1} = \frac{b}{2\pi f}, \quad Q_{sc}^{-1} = \frac{g v_0}{2\pi f}, \quad Q_T^{-1} = Q_i^{-1} + Q_{sc}^{-1}. \quad (4)$$

В результате инверсии для каждого частотного диапазона вычисляются коэффициенты затухания, при этом сначала определяется значение

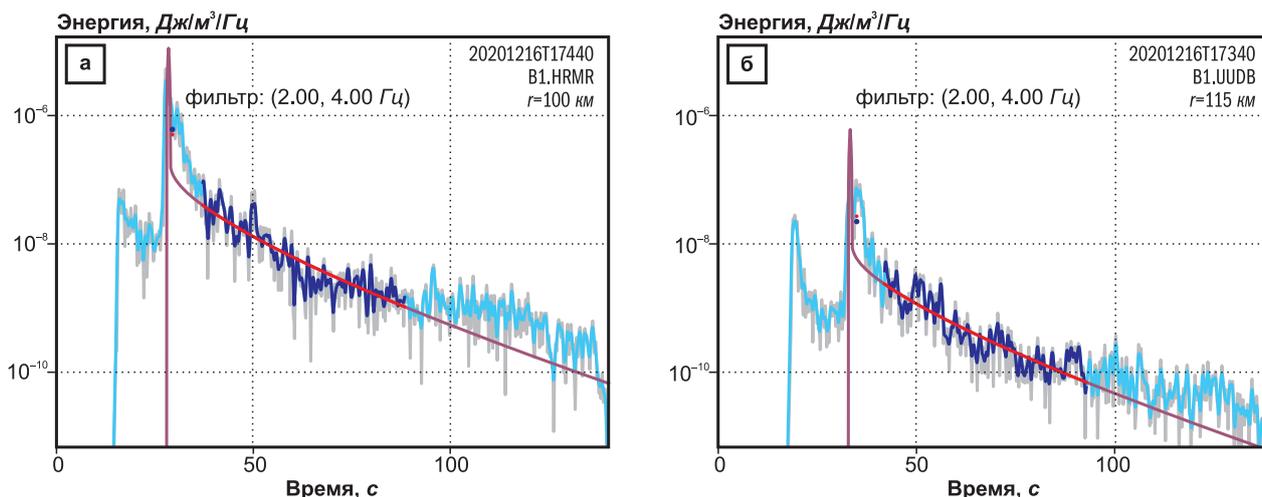


Рис. 2. Пример наблюдаемой (синий цвет) и моделируемой теоретической (красный) огибающей коды и энергии S -волны (точка соответствующего цвета) в частотном диапазоне $2\div 4$ Гц для записей землетрясения 16 декабря 2020 г. (17:43:40) на станциях: а — «Хурамша»; б — «Улан-Удэ».

В правом верхнем углу показаны идентификаторы события и станции (код сети V1), гипоцентрального расстояния r в км

коэффициента рассеяния из соотношения между энергией S -волны и коды [Gaebler et al., 2015], а наклон огибающей, т.е. скорость спада энергии кода-волн во временной области, зависит от коэффициента поглощения. Далее рассчитывается плотность энергии спектрального источника и относительное локальное усиление. Рассчитываемые значения коэффициентов затухания определяют форму теоретической огибающей, а параметры энергии в очаге и усиление приёмника — её амплитудный уровень.

Инверсия огибающей по записям землетрясений из каталога обработки проводилась двумя способами. Отдельно выполнялась станционная инверсия, когда для всего каталога использовались записи только одной станции, и совместная по нескольким станциям, когда одно и то же землетрясение записали хотя бы две станции. Каждый способ расчёта выполнялся итеративно, в несколько шагов.

На первом шаге расчёта в любом виде инверсии (станционная или совместная) определяется среднее затухание в среде. Для каждого частотного диапазона вычисляются робастные значения коэффициентов поглощения и рассеяния, не учитывающие измерения, отстоящие от среднего более, чем на 5σ . Аналогично подходу [Eulenfeld et al., 2021], для расчёта параметров затухания на первом шаге использовались только землетрясения с магнитудами от 2.5, как генерирующие коды достаточной длительности, и соотношением сигнал/шум. На первом шаге инверсии не

выполнялась также обработка событий с магнитудами выше 4.5, поскольку на локальных расстояниях для них может не выполняться предположение о точечном источнике. Тем не менее, полученные коэффициенты затухания в дальнейшем применялись для расчёта очаговых параметров для всего каталога, включающего землетрясения с магнитудами в диапазоне 1.9–5.5.

При совместном расчёте по нескольким станциям на втором этапе расчёта вычислялось частотно-зависимое усиление приёмника, которое, как правило, не зависит от расстояния, кроме случая сильных движений, при которых важна длительность колебаний [Pavlenko, 2020]. На этом шаге, для минимизации неопределённости соотношения между величиной энергии источника и локальным усилением, для станции «Улан-Удэ» (UUDB), установленной на скальных породах с минимальным усилением, аналогично подходу [Pavlenko, Tubanov, 2017] использовалось значение, равное 1.0 во всех частотных диапазонах. Усиление для остальных станций, использованных при совместной инверсии, вычислялось относительно опорной станции UUDB.

Полученные для каждого частотного диапазона значения локального усиления и коэффициенты затухания на третьем шаге применялись для оценки скалярного сейсмического момента M_0 , определяемого низкочастотным уровнем очагового спектра смещения $\omega M(f)$, который рассчитывается по формуле [Sato et al., 2012]:

$$\omega M(f) = \sqrt{\frac{5\rho_0 v_0^5 W}{2\pi f^2}}. \quad (5)$$

Величина сейсмического момента M_0 определяет значение моментной магнитуды M_w [Hanks, Kanamori, 1979]:

$$M_w = 2/3 \cdot \lg M_0 - 6.07. \quad (6)$$

В расчётах использовались значение плотности в районе очага ρ_0 , равное 2700 кг/м^3 [Ризниченко, 1985], и величина коэффициента свободной поверхности $C=4$ [Emoto et al., 2010]. При этом принималось во внимание, что сейсмометры на станциях обработки расположены на заглублении менее первых метров. Среднее значение скорости поперечной волны v_0 взято равным 3500 м/с , как медианное значение для землетрясений на используемых эпицентральных расстояниях.

Значительно влияет на результат обработки выбор длины анализируемого участка прямых волн и коды. В работе [Gusev, Guseva, 2016] для расчёта спектра поперечной волны использовалась длительность записи, равная четверти времени пробега S -волны. В таком случае для максимального эпицентрального расстояния 120 км при скорости 3.5 км/с длительность окна поперечной волны составит 8.57 с . Другой подход определяет конец группы S -волн по достижению

уровня амплитуды до $1/3$ от пикового значения [Пустовитенко, Калинин, 2019]. Для исходного набора данных по трём станциям определены длительность группы S -волны и время спада энергии кода-волн в энергетических единицах согласно методике обработки, используемой алгоритмом инверсии [Eulenfeld, Wegler, 2016]. Использовалось преобразование исходной трёхкомпонентной записи, отфильтрованной в диапазоне $0.1\text{--}40 \text{ Гц}$, в единицы энергии. Фоновый шум рассчитывался в окне длительностью 5 с до вступления продольной волны. Для всех используемых в расчёте пар «станция-землетрясение» находился максимум после вступления поперечной волны и измерялся интервал времени спада энергии до $1/3$ от пикового значения (рис. 3). Продолжительность коды измерялась по достижению огибающей, сглаженной в окне 1 с , значения, в три раза превышающего фоновый уровень. Надо отметить, что величина шума могла изменяться более чем на порядок из-за влияния случайных и детерминированных микросейсмических колебаний [Беседина и др., 2024], из-за чего был получен значительный разброс оценок длительности (рис. 3б). Чтобы избежать влияния вариаций микросейсм на энергию огибающей коды слабых землетрясений, в дальнейшем не выполнялось вычитание квадрата амплитуд фонового шума из отфильтрованного сигнала.

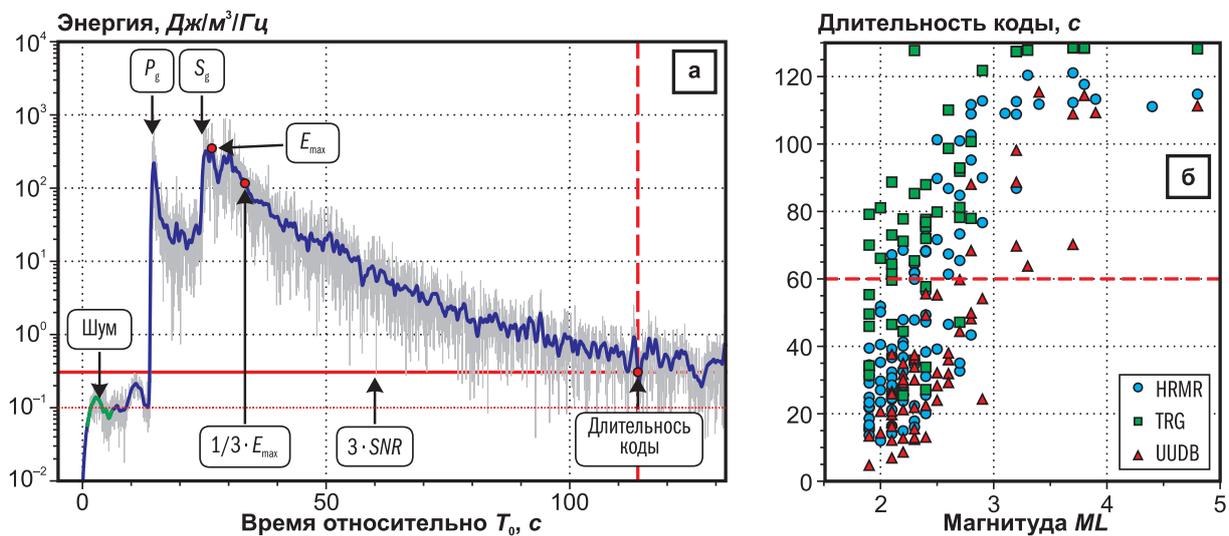


Рис. 3: а – пример определения длительности колебаний в группе поперечных волн и коды по записи землетрясения 2 февраля 2020 г. (22:14:44) с $ML=2.8$, зарегистрированного на расстоянии 87 км от станции «Улан-Удэ». Пунктирной вертикальной линией отмечено время достижения сглаженной огибающей коды трёх величин сигнал/шум.

Красными точками на графике показан максимум S -волны и $1/3$ от его уровня;
б – общая длительность колебаний в коде, начиная от времени вступления S -волны, в зависимости от локальной магнитуды для трёх станций обработки

Максимальная длительность колебаний в группе поперечных волн была получена для станции «Улан-Удэ» (UUDВ) и составила около 9 с. Для станции «Хурамша» (HRMR) продолжительность составила до 7.5 с, т.е. эти данные уже указывают на несколько большее рассеяние энергии в среде на пути до UUDВ, чем для HRMR. Поскольку окно прямых S-волн для анализируемых записей должно включать всю энергию, рассеянную на малые углы, в дальнейшем использовалась его длительность равная 9 с.

Аналогично оценивалась продолжительность колебаний кода-волн. Максимальная длительность спада сейсмической энергии сглаженной огибающей наблюдалась для станции «Тырган». Несмотря на значительный разброс оценок длительности, можно сделать вывод, что на записях землетрясений с $ML > 3$ ($K_p > 9.5$) кода-волны регистрируются больше минуты после вступления S-волны [Тубанов и др., 2021]. С учётом того, что каталог обработки в основном состоял из более слабых землетрясений, длительность записи была ограничена 60 с, соответственно 9 с для прямой S-волны, и 51 с — для коды.

Важно, чтобы анализируемые участки записи соответствовали одной и той же «ветви» огибающей коды [Экспериментальные ..., 1981], поэтому ограничивалась также и минимальная длина окна кода-волн. Сравнение метода кратных окон (MLTWA) с инверсией огибающей [van Laaten et al., 2022] показало сходимость результатов при длительности коды не менее 20 с. В соответствии с методикой анализа спада амплитуд кода-волн [Havskov et al., 2016], при обработке использовалось ограничение на длину коды, которая должна была составлять не менее 30 с при соотношении сигнал/шум (SNR) более 3 в каждом частотном диапазоне. В результате для обработки использовались сейсмограммы общей продолжительностью 2 мин. (120 с), что на используемых эпицентральных расстояниях является достаточным для инверсии записи длительностью 60 с, начиная от вступления S-волны, с запасом 20 с до времени в очаге для анализа уровня шума.

Обсуждение результатов

Затухание

Для корректной оценки сейсмического момента источника важным является точный учёт потерь сейсмической энергии с расстоянием в пределах используемых трасс «источник—приёмник». Как уже отмечалось, для оценки затухания использовались землетрясения с $M \geq 2.5$, из-за чего количество обработанных

сейсмограмм составило около 15–25 шт. для каждой станции. Отдельные измерения были отбракованы, например, записи, зарегистрированные на фоне коды сильного землетрясения, или искажённые помехами. После отбраковки для каждого частотного диапазона пересчитывались робастное среднее и ошибка измерения. Надо отметить меньшее количество измерений на частотах до 1 Гц. Например, на частоте 0.53 Гц для станции «Хурамша» получено всего шесть измерений по записям землетрясений с магнитудой от 3.2, для которых имелось достаточное соотношение сигнал/шум.

На рис. 4 приведены абсолютные величины рассеяния на неоднородностях Q_{sc}^{-1} и поглощения Q_i^{-1} , рассчитанные по каждой из трёх станций отдельно, и в результате совместной обработки.

Разброс отдельных измерений затухания вследствие поглощения Q_i^{-1} (рис. 4б) по всем станциям получен значительно меньшим, по сравнению с величиной рассеяния на неоднородностях (рис. 4а). С минимальной ошибкой измерения поглощение получено для диапазона коротких периодов, частоты выше 1 Гц. Также с увеличением частоты наблюдалось уменьшение ошибки инверсии, т.е. разности между моделируемой и наблюдаемой огибающей. Отчасти это связано с процедурой сглаживания огибающей в окне 1 с, с другой стороны, именно на частотах около 1 Гц лучше проявляются неоднородности свойств затухания в литосфере [Копничев, 1985]. Согласно [Havskov, Ottemoller, 2010], затухание зависит от частоты только для диапазона коротких периодов меньше 1 с. Поэтому для минимальной частоты 0.53 Гц, где имелось небольшое количество измерений, в дальнейшем использовались величины коэффициентов затухания, полученные для центральной частоты 0.75 Гц (диапазон 0.5–1 Гц). Тем самым выполняется предположение о постоянном значении добротности и его независимости от частоты в частотном диапазоне до 1 Гц.

Сравнение абсолютных величин компонент затухания, полученных по каждой станции в отдельности, с результатом совместной инверсии, приведено на рис. 5. Затухание, определяемое одновременно по нескольким станциям, ожидаемо является средним между станционными оценками.

Наибольший разброс станционных оценок затухания получен для рассеяния на неоднородностях среды. Так, для станции «Тырган» рассеяние максимально на частотах до 2 Гц, в то время как на высоких частотах результат для

«Улан-Удэ» на 30–50% превышает среднюю оценку, полученную путём совместной инверсии. Поглощение в диапазоне частот выше 2 Гц для всех станций получено одинаковым, вариации в пределах 5%. Однако на низких частотах выделяется более сильное поглощение для станции «Тырган», на частоте 1 Гц оно отличается от межстанционной оценки на 30%.

Однако на низких частотах выделяется более сильное поглощение для станции «Тырган», на частоте 1 Гц оно отличается от межстанционной оценки на 30%.

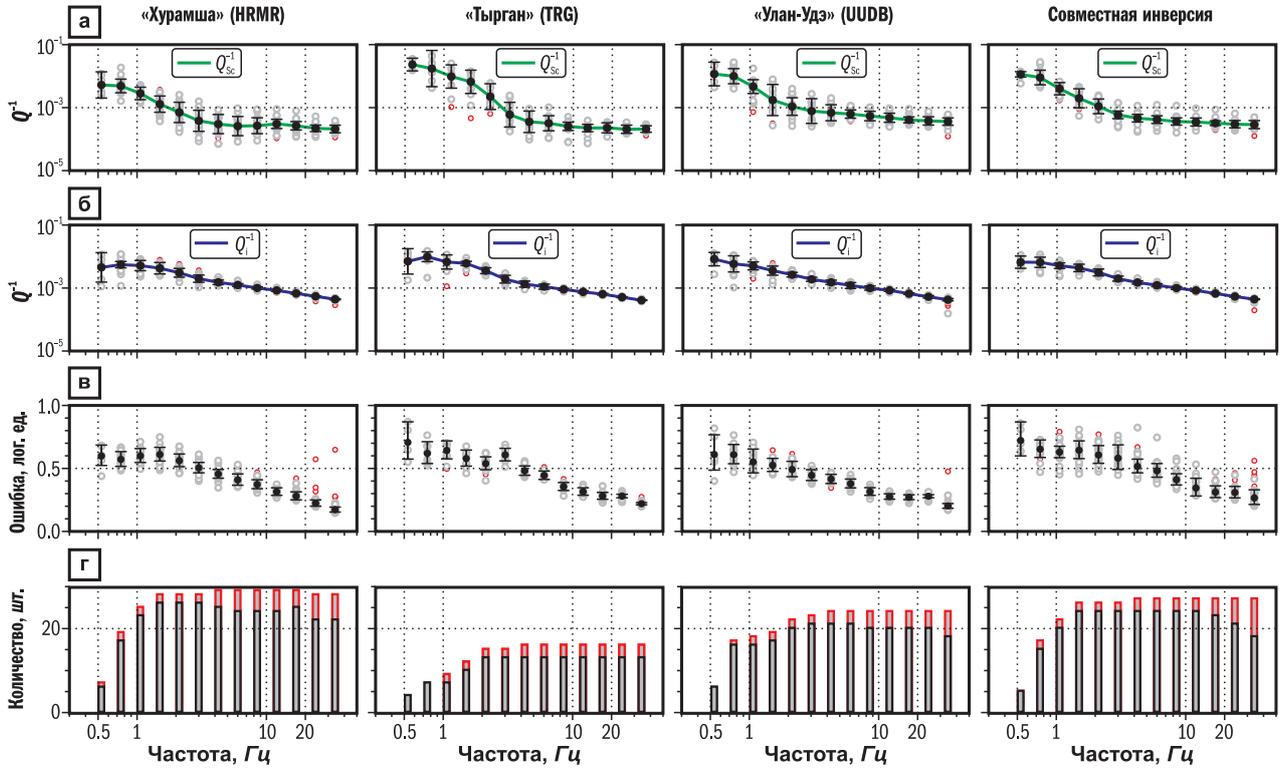


Рис. 4. Отдельные измерения (серые точки) и средние величины с ошибкой измерения (чёрная точка) компонент затухания для станций «Хурамша», «Тырган», «Улан-Удэ», и результат совместной инверсии: а – рассеяния на неоднородностях Q_{sc}^{-1} ; б – поглощения Q_i^{-1} ; в – ошибка инверсии; г – количество измерений на каждой частоте.

Красным цветом на графиках показаны измерения, не включённые в итоговый расчёт

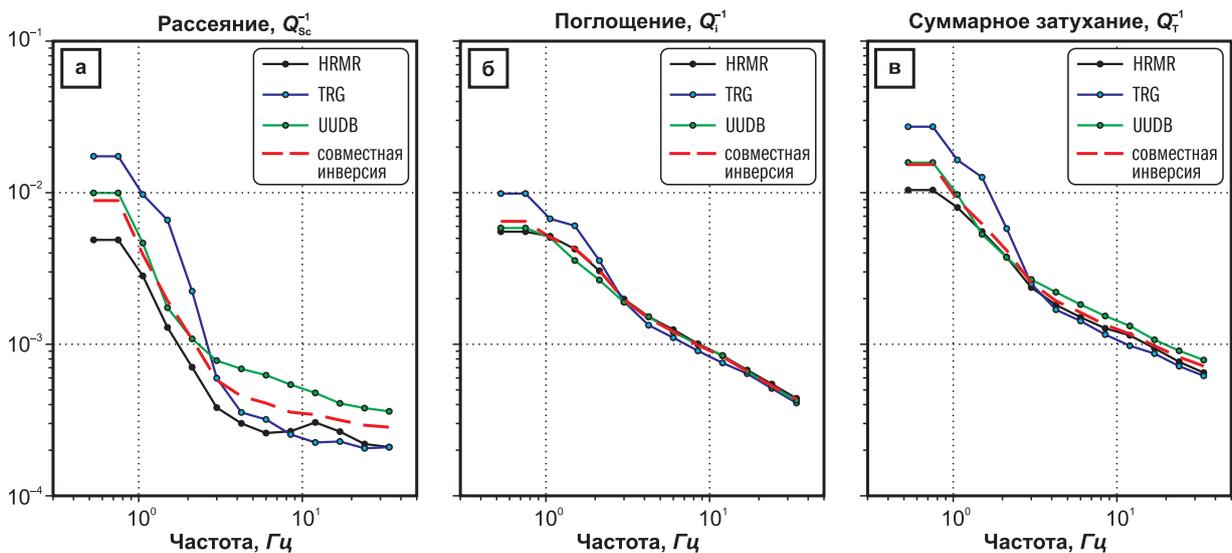


Рис. 5. Рассчитанные величины компонент затухания для трёх станций, и результат совместной инверсии: а – рассеяния Q_{sc}^{-1} ; б – поглощения Q_i^{-1} ; в – суммарного затухания Q_T^{-1}

В общем затухании преобладает собственное поглощение Q_i^{-1} , вклад которого варьирует от 75% для станции «Хурамша» до 60–65% от общих потерь для TRG и UUDB в диапазоне частот выше 1 Гц. Следовательно, среднее суммарное затухание, полученное для всех станций в диапазоне 1–34 Гц, отличается от станционной оценки для UUDB, где получено максимальное рассеяние Q_{sc}^{-1} , на величину не более 15%, что можно считать приемлемым результатом. Полученная при совместной инверсии величина сейсмического альбеда $B_0 = Q_{sc}^{-1}/Q_T^{-1}$, демонстрирующего вклад рассеяния в общие потери энергии Q_T^{-1} , составила 0.33. Таким образом, в среднем 2/3 затухания обусловлено поглощением, одна треть – рассеянием на неоднородностях среды.

Расчитанная добротность (величина, обратная суммарному затуханию) аппроксимируется зависимостью вида $Q_T = 137 \cdot f^{0.75}$. Это значительно отличается от использованного для Центрального Байкала в работе [Pavlenko, Tubanov, 2017] выражения $Q = 80 \cdot f^{0.7}$, где дополнительно вводилась фиксированная величина геометрического расхождения. В отличие от других подходов, метод инверсии включает расхождение, как упругий эффект, в величину рассеяния. Отметим, что на следующих этапах расчёта задавалось значение коэффициентов поглощения и рассеяния на каждой частоте, т.к. аппроксимация степенной зависимостью увеличивает ошибку определения затухания на отдельных частотах до 30%.

Сайт-эффект

Относительное локальное усиление было получено при совместной инверсии записей нескольких станций с введением поправки на фиксированное затухание. Расчёт выполнялся для землетрясений, по которым были записаны хотя бы на двух пунктах наблюдения. Результат определения среднего значения усиления по каждой станции приведён на рис. 6.

Для станции «Улан-Удэ» локальное усиление фиксировалось на уровне около 1.0 для всего диапазона частот. Систематическое завышение станционных оценок магнитуды (энергетического класса), получаемых для станции «Хурамша» при рутинной обработке региональных землетрясений, связано с локальным усилением колебаний, максимально проявляющимся на частотах 4–8 Гц. Ослабление колебаний на низких частотах для пункта наблюдения «Тырган» можно объяснить недооценкой затухания в диапазоне 2–3 Гц, где для станции было получено высокое рассеяние и поглощение по сравнению с межстанционными оценками (рис. 5). Значительное

усиление колебаний на частотах выше 10–12 Гц требует объяснения. В предыдущих исследованиях усиления колебаний в частотном диапазоне до 20 Гц для станции «Тырган» не было обнаружено [Drennov et al., 2011]. В то же время при сильнейшем за последние десятилетия Култукском землетрясении 2008 г. [Чечельницкий и др., 2023] и Быстринском землетрясении 2020 г. в Южном Прибайкалье [Gileva et al., 2021] в этом пункте наблюдений было зарегистрировано аномально высокое значение пикового ускорения грунта с максимальными частотами колебаний в спектре ускорений около 12 Гц. Таким образом, оценка локальных эффектов для TRG нуждается в уточнении. В дальнейшем использовались расчитанные средние значения локального усиления по каждой станции для оценки очаговых параметров землетрясений.

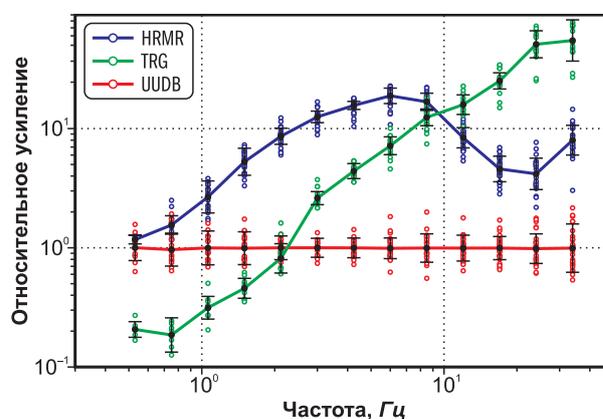


Рис. 6. Отдельные измерения (точки соответствующего цвета) и среднее значение локального усиления с ошибкой определения на каждой частоте, расчитанное для станций «Улан-Удэ» (UUDB), «Хурамша» (HRMR) и «Тырган» (TRG)

Параметры очагов

Далее в работе используется затухание, учитывающее больший вклад рассеяния в области низких частот, и расчитанное локальное усиление для станций, используемых в обработке, для оценки параметров очагов. Традиционный подход оценки очаговых параметров [Abercrombie, 1995], таких как угловая частота, скалярный сейсмический момент и спад высокочастотной части спектра, выполняющийся путём подбора станционных спектров смещения, использует предположение о частотно-независимом постоянном затухании и модель с фиксированным уровнем спада высоких частот, $n=2$ [Brune, 1970]. Однако использование модели омега-квадрата может исказить оценку сейсмического момента

слабых землетрясений [Eulenfeld, Wegler, 2016]. Для аппроксимации модели очагового спектра не использовались предположений ни об уровне спада высокочастотной части спектра, ни о резкости перехода его плато в область выше угловой частоты. Очаговый спектр смещения, и, соответственно, сейсмический момент рассчитывались для записи землетрясения, если имелись измерения уровня спектральной энергии очага как минимум для четырёх частотных диапазонов. На рис. 7 приведён пример расчёта очагового спектра смещения для одного из афтершоков Кударинского землетрясения с $ML=3.7$, произошедшего 16 декабря 2020 г., без учёта локального усиления (рис. 7а), и результат с введённой поправкой на сайт-эффект (рис. 7б).

Расчитанный по записи станции «Хурамша» очаговый спектр без учёта локального усиления в районе станции (рис. 7а) завышен относительно результата совместной инверсии во всех частотных диапазонах. Введение поправки на локальное усиление (рис. 7б) позволяет приблизить оценку сейсмического момента к среднему между станциями. Аналогично для станции «Тырган», без поправки на стационарные условия, наблюдается занижение низкочастотной области и явное завышение спектра на частотах выше 3 Гц (рис. 7а), устраняемое введением поправки на локаль-

ное усиление. Для UUDВ локальное усиление было постоянным, и очаговый спектр хорошо совпадает с результатом совместной инверсии. Однако результат, полученный в результате совместной инверсии по записям нескольких станций, будет более надёжным, поскольку в расчёте используется не только кода, для которой влиянием диаграммы направленности излучения можно пренебречь, но и запись группы поперечных волн, на которые в полной мере влияет этот эффект.

На рис. 8 показаны полученные в результате совместной инверсии моментные магнитуды землетрясений в диапазоне 1.9–5.5, а также стационарные энергетические оценки с введёнными поправками на «стационарное» затухание и локальное усиление, рассчитанными при совместной инверсии. Для результата совместной инверсии было получено соотношение между моментной магнитудой и магнитудой, пересчитанной по формуле [Раутиан, 1960] из величины энергетического класса K_p , вида:

$$M_w = 0.41 + 0.923 \cdot M_L. \quad (7)$$

Для обратного пересчёта моментной магнитуды M_w в величину энергетического класса, соответственно, можно получить выражение:

$$K_p = 3.2 + 1.949 \cdot M_w. \quad (8)$$

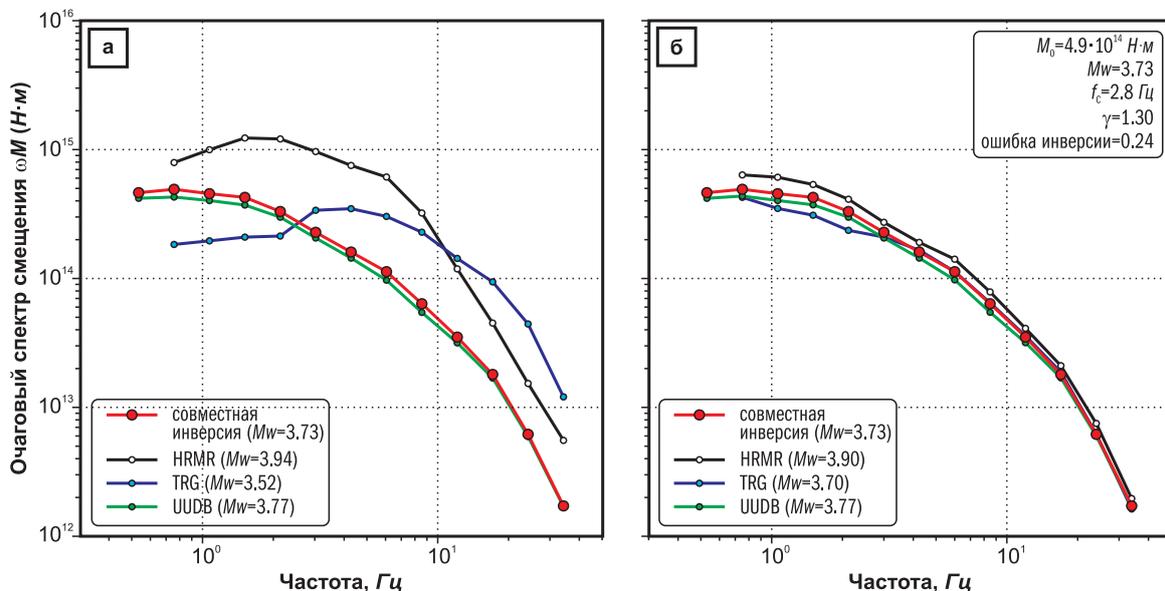


Рис. 7. Пример расчёта очагового спектра в результате совместной инверсии записей землетрясения 16 декабря 2020 г. (17:43:40) по трём станциям (красная линия), и стационарный расчёт:
а – без коррекции на локальные условия приёмника;

б – с коррекцией на рассчитанный при совместной инверсии сайт-эффект (вверху показан рассчитанный при совместной инверсии сейсмический момент, магнитуда M_w , угловая частота f_c , резкость перехода плато спектра к области высоких частот γ и ошибка инверсии в лог. ед.)

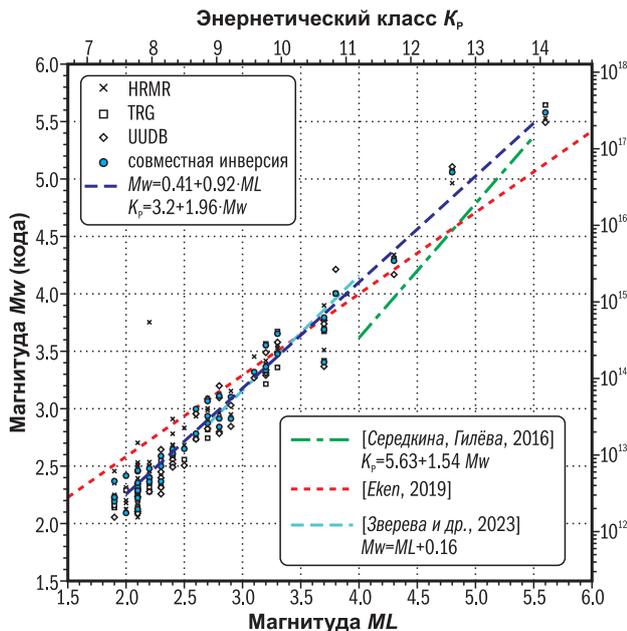


Рис. 8. Зависимость между магнитудами M_L , рассчитанными из величины энергетического класса K_p , и моментной магнитудой по коде M_w , полученной отдельно для каждой станции и в результате совместной инверсии

Соответствие между рассчитанными M_w по коде и величинами M_L как для слабых землетрясений с магнитудами менее 3, так и для всего набора данных, позволяет подтвердить, что разность между моментными и локальными магнитудами близка к постоянной [Abubakirov et al., 2018]. Аналогично для землетрясений Северо-Западного Кавказа в диапазоне $M_L=2.7-4.0$ было получено завышение величины моментной магнитуды на 0.16 по сравнению с локальной [Zvereva et al., 2023].

Выпадающее значение M_w , полученное при совместной инверсии записей по всем станциям — это оценка магнитуды первого афтершока Кударинского землетрясения, произошедшего 9 декабря 2020 г. в 21:49:57. Рассчитанная M_w этого землетрясения составила 3.4, тогда как магнитуда, полученная при пересчёте из величины энергетического класса — 3.7. Станционные оценки M_w сильнейшего афтершока Кударинской последовательности 10 декабря в 14:20:02 находятся в пределах 4.9–5.1, а результат совместной инверсии совпадает с магнитудой, полученной в работе [Tubanov et al., 2022] — $M_w=5.0$.

При станционном расчёте для станции «Хурамша» была получена сильно завышенная энергетическая оценка для события в каталоге, произошедшего 16 августа 2020 г. в 11:56:28,

локализованного на юго-востоке исследуемой территории в асейсмичной области, в 7 км от сейсмостанции «Фофонов» Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Согласно результатам сводной обработки, его магнитуда при пересчёте из величины энергетического класса, составила 2.2, однако рассчитанная M_w по коде — 3.7. Особенностью этого события является то, что в спектре группы поперечных волн практически отсутствуют колебания с частотами выше 8 Гц, и на более высоких частотах огибающая сигнала незначительно превышает уровень микросейсмического шума. Как правило, в спектре землетрясений аналогичной магнитуды преобладают более высокие частоты. При этом рассчитанный для этого события коэффициент рассеяния для частот 0.5–1.0 Гц в четыре раза превышает среднее значение, полученное для станции «Хурамша», а коэффициент поглощения в два раза выше станционного. Аномально высокое затухание связано с тем, что источник излучения расположен на поверхности (карьерный взрыв), и колебания от него распространяются в сильно поглощающей среде. Визуально по волновым формам записи на станции «Хурамша» это событие трудноотлично от тектонического землетрясения, однако инверсия огибающей коды в фиксированных частотных диапазонах позволяет однозначно определить тип сейсмического источника.

Рассчитанные величины моментных магнитуд также сравнивались с оценками для Байкальского региона, полученными по амплитудным спектрам поверхностных волн на телесеизмических расстояниях (рис. 8). Полученная в работе [Середкина, Гилёва, 2016] зависимость для расчёта магнитуды M_w из величины энергетического класса в диапазоне 11.5–14.0, по-видимому, даёт слишком сильное занижение магнитуды слабых землетрясений. Возможно, это связано с недостаточным количеством имеющихся данных в диапазоне магнитуд до 4.5.

По данным Международного сейсмологического центра ISC [International ..., 2024], где сведены результаты обработки мировых сейсмологических агентств, для исследуемой территории за 2019–2022 гг. имеются оценки величины сейсмического момента и моментной магнитуды только для Кударинского землетрясения 9 декабря 2020 года. Согласно этим данным, его скалярный сейсмический момент составил от $1.83 \cdot 10^{17}$ до $2.19 \cdot 10^{17}$ Н·м, а оценки M_w — от 5.44 до 5.49 (решение Геологической службы США, NEIC [Earthquake ..., 2024] и Global CMT [CMT catalog ..., 2024] соответственно). Величина момента M_0 , рассчитанная ФИЦ ЕГС РАН

[Информационное сообщение ..., 2020] по спектру продольных волн, составляет $3.8 \cdot 10^{17} \text{ Н}\cdot\text{м}$, что соответствует магнитуде $M_w=5.65$. Результат, полученный методом инверсии огибающей коды, даёт для землетрясения 9 декабря 2020 г. величину сейсмического момента $2.9 \cdot 10^{17} \text{ Н}\cdot\text{м}$, что соответствует моментной магнитуде 5.57. Надо отметить, что, хотя порядки моментов совпадают, параметры сильных землетрясений, оценённые по поверхностным волнам, могут быть точнее, чем оценки по объёмным волнам региональных станций. В то же время, сведения об очаговых параметрах слабых и умеренных землетрясений можно получить лишь с помощью анализа записей землетрясений, зарегистрированных на локальных расстояниях.

Метод инверсии огибающей коды также использовался для оценки моментных магнитуд в работе [Eken, 2019]. Для области Восточно-Анатолийской зоны разломов была получена зависимость вида $M_w=0.7 \cdot ML+1.17$, т.е. наблюдалось завышение магнитуд слабых землетрясений (рис. 8), в то время как для сильных получено насыщение энергетической оценки. Если верно предположение, что в работе [Eken, 2019] это искажение связано с недостаточно точной оценкой свойств затухания в литосфере региона [Izgi et al., 2020], то можно утверждать, что в данной работе этого удалось избежать.

В целом, получена согласованность между магнитудой, пересчитанной из величины энергетического класса, и моментной магнитудой по коде. Следовательно, даже упрощённая модель изотропного рассеяния поперечных волн может быть эффективной для оценки сейсмического момента и других параметров очагов землетрясений по огибающей коды. Возможен массовый расчёт энергетических параметров слабых и умеренных землетрясений, а именно магнитуд в диапазоне от 2 до 4–4.5, т.е. сейсмических источников, волновые формы которых невозможно надёжно смоделировать на телесеизмических расстояниях.

Заключение

В работе получены оценки скалярного сейсмического момента и рассчитаны моментные магнитуды землетрясений, зарегистрированных на трёх сейсмических станциях в центральной части Байкальского рифта в течение 2019–2022 гг. Для моделирования рассеяния поперечных волн использовался метод инверсии огибающей сейсмической коды, использующий решение теории переноса излучения в предположении изотроп-

ного рассеяния энергии и точечного источника излучения. Метод позволяет дифференциально оценить параметры очага землетрясения, свойства среды распространения сейсмических волн и локальные эффекты станции-приёмника.

Для используемых времён пробега кода-волн и трасс «источник–приёмник» в пределах исследуемой области были получены абсолютные величины рассеяния на неоднородностях среды, составившей 33% от общего затухания, и собственного поглощения, которое в области коротких периодов определено с минимальной погрешностью. Найденные частотно-зависимые коэффициенты затухания и рассчитанное локальное усиление в районе регистрирующей станции позволили получить оценку очагового спектра смещения, оценить скалярный сейсмический момент источника и моментные магнитуды. Для магнитуд в диапазоне 1.9–5.5 получена согласованность между рассчитанной моментной магнитудой по коде M_w и величиной ML , пересчитанной из энергетического класса K_p по Т.Г. Раутиан. Это в дальнейшем даёт возможность массового расчёта энергетических параметров слабых и умеренных землетрясений, т.е. сейсмических источников, волновые формы которых невозможно надёжно смоделировать на телесеизмических расстояниях.

Поскольку исследования выполнены для землетрясений, локализованных в небольшой области в пределах центральной части Байкальского рифта, в дальнейшем требуется уточнение как латеральных вариаций поглощения и рассеяния энергии сейсмических волн, так и зависимости затухания от эпицентрального расстояния. Это позволит использовать метод инверсии огибающей коды для автоматизированного определения параметров очагов региональных землетрясений.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственных заданий № АААА-А21-121011890033-1, № 075-00682-24) 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

Беседина А.Н., Тубанов Ц.А., Предеин П.А., Санжиева Д.П., Иванченко Г.Н. Особенности микросейсм озера Байкал по данным сети сейсмических станций

- // Физика Земли. — 2024. — № 3. — С. 30–50. — DOI: 10.31857/S0002333724030041
- Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы* / Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. Кн. 2: Микросейсмичность. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. — 96 с. — EDN: QKGNRR
- Информационное сообщение об ощутимом землетрясении в районе озера Байкал 9 декабря 2020 г.* // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. — URL: <http://mseism.gsras.ru/eqinfo/faces/archive.xhtml> (дата обращения 10.01.2024).
- Кобелева Е.А., Гилёва Н.А., Хамидулина О.А., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А.* Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Прибайкалье и Забайкалье // *Землетрясения России в 2020 году*. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. — С. 45–52. — EDN: CLFOAC
- Кондратьев О.К.* Отражённые волны в тонкослоистых средах. — М.: Наука, 1976. — 191 с.
- Копничев Ю.Ф.* Короткопериодные сейсмические волновые поля / Отв. ред. А.В. Николаев. — М.: Наука, 1985. — 176 с. — EDN: YSXVTK
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времён до 1975 г.* / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. — М.: Наука, 1977. — 536 с.
- Петрова Н.В., Курова А.Д.* Сопоставление систем классификации землетрясений в локальных магнитудах M_L в некоторых регионах Северной Евразии // *Российский сейсмологический журнал*. — 2023. — Т. 5, № 2. — С. 61–76. — DOI: 10.35540/2686-7907.2023.2.05. — EDN: LTIMEJ
- Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В.* Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона // *Землетрясения Северной Евразии*. — Вып. 22 (2013 г.). — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. — С. 299–310. — DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.27. — EDN: JBOVBE
- Раутиан Т.Г.* Энергия землетрясений // *Методы детального изучения сейсмичности* (Тр. ИФЗ АН СССР, № 9(176)). — М.: ИФЗ АН СССР, 1960. — С. 75–114.
- Ризниченко Ю.В.* Проблемы сейсмологии. Избранные труды. — М.: Наука, 1985. — 408 с.
- Середкина А.И., Гилёва Н.А.* Зависимость между моментной магнитудой и энергетическим классом для землетрясений Прибайкалья и Забайкалья // *Сейсмические приборы*. — 2016. — Т. 52, № 2. — С. 29–38. — EDN: WAZAED
- Солоненко В.П., Тресков А.А.* Среднебайкальское землетрясение 29 августа 1959 года. — Иркутск: Иркутское кн. изд-во, 1960. — 36 с.
- Тубанов Ц.А., Предеин П.А., Цыдыпова Л.Р., Санжиева Д.П.Д., Радзиминович Н.А., Базаров А.Д.* Результаты и перспективы сейсмологических наблюдений в центральной части Байкальского рифта // *Российский сейсмологический журнал*. — 2021. — Т. 3, № 4. — С. 38–57. — DOI: 10.35540/2686-7907.2021.4.03. — EDN: TSNREJ
- Чечельницкий В.В., Добрынина А.А., Саньков В.А.* Сравнение параметров сейсмических колебаний при Култукском 27.08.2008 г. M_w 6.3, Быстринском 21.09.2010 г. M_w 5.5 и Хубсугульском 11.01.2021 г. M_w 6.8 землетрясениях // *Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона: тезисы докладов XIV Российско-Монгольской Международной конференции* / Отв. ред. В.А. Саньков, А.А. Добрынина. — Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2023. — С. 74.
- Экспериментальные исследования сейсмической коды* / Отв. ред. И.Л. Нерсесов. — М.: Наука, 1981. — 142 с. — EDN: TQPOBT
- Abercrombie R.E.* Earthquake source scaling relationships from -1 to $5 M_L$ using seismograms recorded at 2.5-km depth // *Journal of Geophysical Research*. — 1995. — V. 100, N B12. — P. 24.015–24.036. — DOI: 10.1029/95JB02397
- Abubakirov I.R., Gusev A.A.* Estimation of scattering properties of lithosphere of Kamchatka based on Monte-Carlo simulation of record envelope of a near earthquake // *Physics of the earth and Planetary Interiors*. — 1990. — V. 64, N 1. — P. 52–67. — DOI: 10.1016/0031-9201(90)90005-I. — EDN: XPJQZJ
- Abubakirov I.R., Gusev A.A., Guseva E.M., Pavlov V.M., Skorkina A.A.* Mass determination of moment magnitudes M_w and establishing the relationship between M_w and M_L for moderate and small Kamchatka earthquakes // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. — 2018. — V. 54, N 1. — P. 33–47. — DOI: 10.1134/S1069351318010019. — EDN: UYJNWL
- Aki K.* Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves // *Journal of Geophysical Research*. — 1969. — V. 74, N 2. — P. 615–631. — DOI: 10.1029/JB074i002p00615
- Aki K., Chouet B.* Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects // *Journal of Geophysical Research*. — 1975. — V. 80, N 23. — P. 3322–3342. — DOI: 10.1029/JB080i023p03322
- Aki K., Richards P.G.* Quantitative seismology: Theory and Methods. — San Francisco: W.H. Freeman and Co., 1980. — 948 p.
- Boore D.M.* Simulation of ground motion using the stochastic method // *Pure and Applied Geophysics*. — 2003. — V. 160, N 3. — P. 635–676. — DOI: 10.1007/PL00012553
- Bormann P.* New manual of seismological observatory practice (NMSOP-2). IASPEI. — Potsdam, Germany:

- GFZ German Research Centre for Geosciences, 2012. – DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2
- Brune J.N.* Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // *Journal of Geophysical Research*. – 1970. – V. 75, N 26. – P. 4997–5009. – DOI: 10.1029/JB075I026P04997
- Drennov A.F., Dzhurik V.I., Serebrinnikov S.P., Drennova N.N.* Influence of the upper section on the amplitude-frequency content of a seismic signal by the example of seismic stations in the Baikal and the Transbaikalian region // *Seismic Instruments*. – 2011. – V. 47, N 1. – P. 57–65. – DOI: 10.3103/S0747923911010099
- Earthquake Hazards Program // USGS [Site]*. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/event-page/us7000cpkf/moment-tensor> (дата обращения 17.06.2024).
- Eken T.* Moment magnitude estimates for central Anatolian earthquakes using coda waves // *Solid Earth*. – 2019. – V. 10, Iss. 3. – P. 713–723. – DOI: 10.5194/se-10-713-2019. – EDN: WCZYSU
- Emoto K., Sato H., Nishimura T.* Synthesis of vector wave envelopes on the free surface of a random medium for the vertical incidence of a plane wavelet based on the Markov approximation // *Journal of Geophysical Research*. – 2010. – V. 115, Iss. B8. – P. B08306. – DOI: 10.1029/2009JB006955
- Eulenfeld T., Dahm T., Heimann S., Wegler U.* Fast and robust earthquake source spectra and moment magnitudes from envelope inversion // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2021. – V. 112, N 2. – P. 878–893. – DOI: 10.1785/0120210200
- Eulenfeld T., Hillers G., Vuorinen T., Wegler U.* Induced earthquake source parameters, attenuation, and site effects from waveform envelopes in the Fennoscandian Shield // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2023. – V. 128, N 4. – P. e2022JB025162. – DOI: 10.1029/2022JB025162
- Eulenfeld T., Wegler U.* Measurement of intrinsic and scattering attenuation of shear waves in two sedimentary basins and comparison to crystalline sites in Germany // *Geophysical Journal International*. – 2016. – V. 205, N 2. – P. 744–757. – DOI: 10.1093/gji/ggw035
- Eulenfeld T., Wegler U.* Crustal intrinsic and scattering attenuation of high-frequency shear waves in the contiguous United States // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2017. – V. 122, N 6. – P. 4676–4690. – DOI: 10.1002/2017JB014038
- Fehler M., Hoshiya M., Sato H., Obara K.* Separation of scattering and intrinsic attenuation for the Kanto-Tokai region, Japan, using measurements of S-wave energy versus hypocentral distance // *Geophysical Journal International*. – 1992. – V. 108, N 3. – P. 787–800. – DOI: 10.1111/J.1365-246X.1992.TB03470.X
- Gaebler P.J., Eulenfeld T., Wegler U.* Seismic scattering and absorption parameters in the W-Bohemia/Vogtland region from elastic and acoustic radiative transfer theory // *Geophysical Journal International*. – 2015. – V. 2013, N 3. – P. 1471–1481. – DOI: 10.1093/gji/ggv393
- Gileva N.A., Kobeleva E.A., Radziminovich Yan B., Melnikova V.I., Chechelnitzky V.V.* The September 21, 2020, $M_w=5.5$, Bystraya earthquake in the Southern Baikal region: preliminary results of instrumental and macroseismic observations // *Seismic Instruments*. – 2021. – V. 57, N 2. – P. 173–186. – DOI: 10.3103/S0747923921020237
- CMT catalog web search // Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project [Site]*. – URL: <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (дата обращения 17.06.2024).
- Gusev A.A., Guseva E.M.* Shear wave attenuation estimated from the spectral decay rate in the vicinity of the Petropavlovsk station, Kamchatka // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2016. – V. 52, N 4. – P. 503–519. – DOI: 10.1134/S1069351316030034. – EDN: UNTOZA
- Hanks T.C., Kanamori H.* A moment magnitude scale // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 1979. – V. 84, N B5. – P. 2348–2350. – DOI: 10.1029/JB084I05P02348
- Havskov J., Sørensen M.B., Vales D., Özyazıcıoğlu M., Sanchez G., Li B.* Coda Q in different tectonic areas, influence of processing parameters // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2016. – V. 106, N 3. – P. 956–970. – DOI: 10.1785/0120150359
- Havskov J., Ottemoller L.* Routine data processing in earthquake seismology: with sample data, exercises and software. – Springer Science & Business Media, 2010. – 347 p. – DOI: 10.1007/978-90-481-8697-6
- Heller G., Margerin L., Sebe O., Mayor J.* Revisiting multiple-scattering principles in a crustal waveguide: equipartition, depolarization and coda normalization // *Pure and Applied Geophysics*. – 2022. – V. 179. – P. 2031–2065. – DOI: 10.1007/s00024-022-03063-3
- International Seismological Centre (ISC).* On-line Bulletin [Site]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>. – United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre, 2024. – DOI: 10.31905/D808B830
- Izgi G., Eken T., Gaebler P.J., Eulenfeld T., Tuncay T.* Crustal seismic attenuation parameters in the western region of the North Anatolian Fault Zone // *Journal of Geodynamics*. – 2020. – V. 134, N 2. – P. 101694. – DOI: 10.1016/j.jog.2020.101694
- Kennett B.L.N.* Seismic wave propagation in stratified media. – ANU E Press, 2009. – 288 p.
- Margerin L., Campillo M., van Tiggelen B.* Monte Carlo simulation of multiple scattering of elastic waves // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2000. – V. 105, N B4. – P. 7873–7892. – DOI: 10.1029/1999jb900359. – EDN: LWADRL

- Mayeda K., Hofstetter A., O'Boyle J.L., Walter W. Stable and transportable regional magnitudes based on coda-derived moment-rate spectra // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2003. — V. 93, N 1. — P. 224–239. — DOI: 10.1785/0120020020
- Mitchell B.J., Cong L., Ekström G. A continent-wide map of 1-Hz Lg coda Q variation across Eurasia and its relation to lithospheric evolution // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2008. — V. 113, Iss. B4. — B04303. — DOI: 10.1029/2007JB005065
- Pavlenko O.V. Modern methods of estimating local effects of earthquakes // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. — 2020. — V. 56, N 5. — P. 656–664. — DOI: 10.1134/S1069351320040060. — EDN: UPWHTD
- Pavlenko O.V., Tubanov Ts.A. Characteristics of radiation and propagation of seismic waves in the Baikal Rift Zone estimated by simulations of acceleration time histories of the recorded earthquakes // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. — 2017. — V. 53, N 1. — P. 18–31. — DOI: 10.1134/S1069351317010116. — EDN: YVCNGN
- Pavlis G.L., Vernon F.L. Calibration of seismometers using ground noise // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1994. — V. 84, N 4. — P. 1243–1255. — DOI: 10.1785/bssa0840041243
- Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales // Seismological Research Letters. — 2007. — V. 78, N 6. — P. 579–590. — DOI: 10.1785/gssrl.78.6.579
- Sato H., Fehler M.C., Maeda T. Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth. — Berlin: Springer, 2012. — 496 p. — DOI: 10.1007/978-3-642-23029-5
- Sens-Schönfelder C., Wegler U. Radiative transfer theory for estimation of the seismic moment // Geophysical Journal International. — 2006. — V. 167, Iss. 3. — P. 1363–1372. — DOI: 10.1111/J.1365-246X.2006.03139.X
- Separation of intrinsic and scattering Q by envelope inversion // Github [Site]. — URL: <https://github.com/trichter/qopen> (дата обращения 17.04.2024).
- Tubanov Ts.A., Sanzhieva D.P.D., Kobeleva E.A., Predein P.A., Tsydypova L.R. Kudara earthquake of September 12, 2020 ($M_w=5.5$) on Lake Baikal: results of instrumental and macroseismic observations // Seismic Instruments. — 2022. — V. 58, N 1. — P. 86–98. — DOI: 10.3103/S0747923922010108
- van Laaten M., Eulenfeld T., Wegler U. Comparison of Multiple Lapse Time Window Analysis and Qopen to determine intrinsic and scattering attenuation // Geophysical Journal International. — 2022. — V. 228, Iss. 2. — P. 913–926. — DOI: 10.1093/gji/ggab390
- Zvereva A.S., Sobisevich A.L., Likhodeev D.V. Moment and Local Magnitudes Calibration for Earthquakes in the Northwest Caucasus // Doklady Earth Sciences. — 2023. — V. 507, N S2. — P. S304–S312. — DOI: 10.1134/S1028334X2260116X

Сведения об авторах

Предин Пётр Алексеевич, канд. геол.-мин. наук, науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологического института им. Н.Л. Дубрецова Сибирского отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН); инженер Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (БуФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Улан-Удэ, Россия. E-mail: crmpeter@ginst.ru

Хритова Мария Анатольевна, канд. техн. наук, нач. сектора Байкальского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (БФ ФИЦ ЕГС РАН); науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН), г. Иркутск, Россия. E-mail: hritova@crust.irk.ru

Seismic moment of local earthquakes in the central part of the Baikal rift by the coda envelope inversion

© 2024 P.A. Predein^{1,2}, M.A. Khritova^{3,4}

¹GIN SB RAS, Ulan-Ude, Russia; ²BuB GS RAS, Ulan-Ude, Russia;

³BB GS RAS, Irkutsk, Russia; ⁴IEC SB RAS, Irkutsk, Russia

Received June 25, 2024

Abstract The article presents an estimation of scalar seismic moment by the coda envelope inversion of local earthquakes recordings in the central part of the Baikal rift zone. In addition to the earthquake source parameters, the method allows us to simultaneously estimate seismic energy loss and site amplification factors for frequency bands from 0.53 to 34 Hz. Because of the compromise between spectral source energy and site responses, we estimated amplification factors for used stations relative to the “Ulan-Ude” (UUDB) reference site located in crystalline rock. In order to estimate intrinsic and scattering attenuation we used events recorded at three broadband seismic stations and epicentral distances between 40 and 120 km. The result suggests that intrinsic absorption is dominant over scattering attenuation in the central part of the Baikal rift zone for most frequency bands, but the seismic albedo B_0 , expressing the contribution of scattering to the total attenuation, showed variations from 0.23 to 0.6 for frequencies below 1 Hz, with mean B_0 value 0.33. Attenuation and site-amplification factors were used to estimate the seismic moment and moment magnitudes M_w of local earthquakes. The resultant moment magnitudes exhibit a good agreement with routinely reported local magnitude (ML) estimates for the study area. The coda inversion estimates of seismic moment provide stable, unbiased moment magnitudes for events that are too small to be seen at teleseismic distances.

Keywords Inversion, envelope, coda, absorption, scattering, seismic moment, magnitude.

For citation Predein, P.A., & Khritova, M.A. (2024). [Seismic moment of local earthquakes in the central part of the Baikal rift by the coda envelope inversion]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 6(3), 40-59. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.3.03>. EDN: TGCUME

References

- Abercrombie, R.E. (1995). Earthquake source scaling relationships from -1 to 5 ML using seismograms recorded at 2.5-km depth. *Journal of Geophysical Research*, 100(B12), 24.015-24.036. DOI: [10.1029/95JB02397](https://doi.org/10.1029/95JB02397)
- Abubakirov, I.R., & Gusev, A.A. (1990). Estimation of scattering properties of lithosphere of Kamchatka based on Monte-Carlo simulation of record envelope of a near earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64(1), 52-67. DOI: [10.1016/0031-9201\(90\)90005-I](https://doi.org/10.1016/0031-9201(90)90005-I). EDN: XPJOZJ
- Abubakirov, I.R., Gusev, A.A., Guseva, E.M., Pavlov, V.M., & Skorkina, A.A. (2018). Mass determination of moment magnitudes M_w and establishing the relationship between M_w and ML for moderate and small Kamchatka earthquakes. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 54(1), 33-47. DOI: [10.1134/S1069351318010019](https://doi.org/10.1134/S1069351318010019). EDN: UYJNWL
- Aki, K. (1969). Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. *Journal of Geophysical Research*, 74(2), 615-631. DOI: [10.1029/JB074i002p00615](https://doi.org/10.1029/JB074i002p00615)
- Aki, K., & Chouet, B. (1975). Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects. *Journal of Geophysical Research*, 80(23), 3322-3342. DOI: [10.1029/JB080i023p03322](https://doi.org/10.1029/JB080i023p03322)
- Aki, K., & Richards, P.G. (1980). *Quantitative seismology: Theory and Methods*. San Francisco: W.H. Freeman and Co., 948 p.
- Besedina, A.N., Tubanov, T.A., Predein, P.A., Sanzhieva, D.P., Ivanchenko, G.N. (2024). [Lake Baikal Microseisms Based on Regional Seismic Network Data]. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth], 3, 30-50. DOI: [10.31857/S0002333724030041](https://doi.org/10.31857/S0002333724030041)
- Boore, D.M. (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3), 635-676. DOI: [10.1007/PL00012553](https://doi.org/10.1007/PL00012553)
- Bormann, P. (2012). *New manual of seismological observatory practice (NMSOP-2)*. IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam. DOI: [10.2312/GFZ.NMSOP-2](https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2)

- Brune, J.N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75(26), 4997-5009. DOI: 10.1029/JB075I026P04997
- Chechel'nitsky, V.V., Dobrynina, A.A., & Sankov, V.A. (2023). [Comparison of seismic vibration parameters during the Kultuk 08/27/2008 Mw 6.3, Bystrinsky 09/21/2010 Mw 5.5 and Khubsugul 01/11/2021 Mw 6.8 earthquakes]. In *Tez. dokl. XIV Rossiisko-Mongol'skoi mezhdunarodnoi konferentsii "Solnechno-zemnye svyazi i geodinamika Baikalo-Mongol'skogo regiona"* [Proceedings of the XIV Russian-Mongolian International Conference "Solar-terrestrial relations and geodynamics of the Baikal-Mongolian region"] (p. 74). Irkutsk, Russia: IEC SB RAS Publ. (In Russ.).
- Drennov, A.F., Dzhurik, V.I., Serebrinnikov, S.P., & Drennova, N.N. (2011). Influence of the upper section on the amplitude-frequency content of a seismic signal by the example of seismic stations in the Baikal and the Transbaikal region. *Seismic Instruments*, 47(1), 57-65. DOI: 10.3103/S0747923911010099
- Earthquake Hazards Program. (2024). USGS. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000cpkf/moment-tensor>
- Eken, T. (2019). Moment magnitude estimates for central Anatolian earthquakes using coda waves. *Solid Earth*, 10(3), 713-723. DOI: 10.5194/se-10-713-2019. EDN: WCZYU
- Eksperimental'nye issledovaniia seismicheskoi kody. Otv. red. I.L. Nersesov* [Experimental studies of the seismic coda. Ed. I.L. Nersesov]. (1981). Moscow, Russia: Nauka Publ., 142 p. (In Russ.). EDN: TQPOBT
- Emoto, K., Sato, H., & Nishimura, T. (2010). Synthesis of vector wave envelopes on the free surface of a random medium for the vertical incidence of a plane wavelet based on the Markov approximation. *Journal of Geophysical Research*, 115(B8), B08306. DOI: 10.1029/2009JB006955
- Eulenfeld, T., Dahm, T., Heimann, S., & Wegler, U. (2021). Fast and robust earthquake source spectra and moment magnitudes from envelope inversion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112(2), 878-893. DOI: 10.1785/0120210200
- Eulenfeld, T., Hillers, G., Vuorinen, T., & Wegler, U. (2023). Induced earthquake source parameters, attenuation, and site effects from waveform envelopes in the Fennoscandian Shield. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(4), e2022JB025162. DOI: 10.1029/2022JB025162
- Eulenfeld, T., & Wegler, U. (2016). Measurement of intrinsic and scattering attenuation of shear waves in two sedimentary basins and comparison to crystalline sites in Germany. *Geophysical Journal International*, 205(2), 744-757. DOI: 10.1093/gji/ggw035
- Eulenfeld, T., & Wegler, U. (2017). Crustal intrinsic and scattering attenuation of high-frequency shear waves in the contiguous United States. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(6), 4676-4690. DOI: 10.1002/2017JB014038
- Fehler, M., Hoshiya, M., Sato, H., & Obara, K. (1992). Separation of scattering and intrinsic attenuation for the Kanto-Tokai region, Japan, using measurements of S-wave energy versus hypocentral distance. *Geophysical Journal International*, 108(3), 787-800. DOI: 10.1111/J.1365-246X.1992.TB03470.X
- Gaebler, P.J., Eulenfeld, T., & Wegler, U. (2015). Seismic scattering and absorption parameters in the W-Bohemia/Vogtland region from elastic and acoustic radiative transfer theory. *Geophysical Journal International*, 2013(3), 1471-1481. DOI: 10.1093/gji/ggv393
- Gileva, N.A., Kobeleva, E.A., Radziminovich, Yan B., Melnikova, V.I., & Chechel'nitsky, V.V. (2021). The September 21, 2020, Mw=5.5, Bystraya earthquake in the Southern Baikal region: preliminary results of instrumental and macroseismic observations. *Seismic Instruments*, 57(2), 173-186. DOI: 10.3103/S0747923921020237
- Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project. (2024). CMT catalog web search. Retrieved from <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
- Gusev, A.A., & Guseva, E.M. (2016). Shear wave attenuation estimated from the spectral decay rate in the vicinity of the Petropavlovsk station, Kamchatka. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 52(4), 503-519. DOI: 10.1134/S1069351316030034. EDN: UNTOZA
- Hanks, T.C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348-2350. DOI: 10.1029/JB084IB05P02348
- Havskov, J., Sørensen, M. B., Vales, D., Özyazıcıoğlu, M., Sanchez, G., & Li, B. (2016). Coda Q in different tectonic areas, influence of processing parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(3), 956-970. DOI: 10.1785/0120150359
- Havskov, J., & Ottemoller, L. (2010). *Routine data processing in earthquake seismology: with sample data, exercises and software*. Springer Science & Business Media, 347 p. DOI: 10.1007/978-90-481-8697-6
- Heller, G., Margerin, L., Sebe, O., & Mayor, J. (2022). Revisiting multiple-scattering principles in a crustal waveguide: equipartition, depolarization and coda normalization. *Pure and Applied Geophysics*, 179, 2031-2065. DOI: 10.1007/s00024-022-03063-3
- Information message about the strong earthquake on December 9, 2020 in the Lake Baykal region, Russia. (2020). GS RAS. Retrieved from <http://mseism.gsras.ru/EqInfo/faces/archive.xhtml>
- International Seismological Centre. (2024). On-line Bulletin. Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>. DOI: 10.31905/D808B830

- Izgi, G., Eken, T., Gaebler, P.J., Eulenfeld, T., & Tuncay, T. (2020). Crustal seismic attenuation parameters in the western region of the North Anatolian Fault Zone. *Journal of Geodynamics*, 134(2), 101694. DOI: 10.1016/j.jog.2020.101694
- Kennett, B.L.N. (2009). *Seismic wave propagation in stratified media*. ANU E Press, 288 p.
- Kobeleva, E.A., Gileva, N.A., Khamidulina, O.A., Radziminovich, Ya.B., & Tubanov, Ts.A. (2022). [Results of seismic monitoring of various regions of Russia. Baikal and Transbaikalia]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2020 godu* [Earthquakes in Russia in 2020] (pp. 45-52). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: CLFOAC
- Kondratiev, O.K. (1976). *Otrazhennyye volny v tonkosloistykh sredakh* [Reflected waves in thin-layer media]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 191 p. (In Russ.).
- Kopnischev, Yu.F. (1985). *Korotkoperiodnyye seismicheskie volnovyye polia*. *Otv. red. A.V. Nikolaev* [Short-period seismic wave fields. Ed. A.V. Nikolaev]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 176 p. (In Russ.). EDN: YSXBTK
- Margerin, L., Campillo, M., & van Tiggelen, B. (2000). Monte Carlo simulation of multiple scattering of elastic waves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B4), 7873-7892. DOI: 10.1029/1999jb900359. EDN: LWADRL
- Mayeda, K., Hofstetter, A., O'Boyle, J.L., & Walter, W. (2003). Stable and transportable regional magnitudes based on coda-derived moment-rate spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(1), 224-239. DOI: 10.1785/0120020020
- Mitchell, B.J., Cong, L., & Ekström, G. (2008). A continent-wide map of 1-Hz Lg coda Q variation across Eurasia and its relation to lithospheric evolution. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B4), B04303. DOI: 10.1029/2007JB005065
- Novyi katalog sil'nykh zemletriasenii na territorii SSSR s drevneishikh vremen do 1975 g.* *Otv. red. I.V. Kondorskaya, N.V. Shebalin* [New catalog of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975 / Eds.: N.V. Kondorskaya, N.V. Shebalin]. (1977). Moscow, Russia: Nauka Publ., 536 p. (In Russ.).
- Pavlenko, O.V. (2020). Modern methods of estimating local effects of earthquakes. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 56(5), 656-664. DOI: 10.1134/S1069351320040060. EDN: UPWHTD
- Pavlenko, O.V., & Tubanov, Ts.A. (2017). Characteristics of radiation and propagation of seismic waves in the Baikal Rift Zone estimated by simulations of acceleration time histories of the recorded earthquakes. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 53(1), 18-31. DOI: 10.1134/S1069351317010116. EDN: YVCNGN
- Pavlis, G.L., & Vernon, F.L. (1994). Calibration of seismometers using ground noise. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 1243-1255. DOI: 10.1785/bssa0840041243
- Petrova, N.V., & Kurova, A.D. (2023). [Comparison of earthquake classification systems in local magnitudes ML in some regions of Northern Eurasia]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(2), 61-76. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2023.2.05. EDN: LTIMEJ
- Pustovitenko, B.G., & Kalinyuk, I.V. (2019). [Source parameters of Crimean-Black Sea region earthquakes]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22(2013), 299-310. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.27. EDN: JBOBBE
- Rautian, T.G. (1960). [Energy of the Earthquakes]. In *Metody detal'nogo izucheniya seismichnosti. Trudy IFZ ANSSSR*, 9(176). [Methods of Detailed Study of the Seismicity. Proceedings of the IPE AS USSR № 9(176)] (pp. 75-114). Moscow, Russia: IPE AS USSR Publ. (In Russ.).
- Rautian, T.G., Khalturin, V.I., Fujita, K., Mackey, K.G., & Kendall, A.D. (2007). Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales. *Seismological Research Letters*, 78(6), 579-590. DOI: 10.1785/gssrl.78.6.579
- Riznichenko, Yu.V. (1985). *Problemy seismologii. Izbrannyye trudy* [Seismology problems. Selected Works]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 408 p. (In Russ.).
- Sato, H., Fehler, M.C., & Maeda, T. (2012). *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth*. Berlin: Springer, 496 p. DOI: 10.1007/978-3-642-23029-5
- Sens-Schönfelder, C., & Wegler, U. (2006). Radiative transfer theory for estimation of the seismic moment. *Geophysical Journal International*, 167(3), 1363-1372. DOI: 10.1111/J.1365-246X.2006.03139.X
- GitHub (2024). Separation of intrinsic and scattering Q by envelope inversion. Retrieved from <https://github.com/trichter/qopen/>
- Seredkina, A.I., & Gileva, N.A. (2016). [Correlation between moment magnitude and energy class of earthquakes in Pribaikalia and Transbaikalia]. *Seismicheskie pribory* [Seismic instruments], 52(2), 29-38. (In Russ.). EDN: WAZAED
- Solonenko, V.P., & Treskov, A.A. (1960). *Srednebaikalskoe zemletriasenie 29 avgusta 1959 goda* [Middle Baikal earthquake on August 29, 1959]. Irkutsk, Russia: Irkutsk book Publ., 36 p. (In Russ.).
- Tubanov, Ts.A., Predein, P.A., Tsydypova, L.R., Sanzhieva, D.P.D., Radziminovich, N.A., & Bazarov, A.D. (2021). [Results and prospects of seismological observations in the Central part of the Baikal rift]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(4), 38-57. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2021.4.03. EDN: TSNREJ

- Tubein, Ts.A., Sanzhieva, D.P.D., Kobeleva, E.A., Predein, P.A., & Tsydyanova, L.R. (2022). Kudara earthquake of September 12, 2020 (Mw=5.5) on Lake Baikal: results of instrumental and macroseismic observations. *Seismic Instruments*, 58(1), 86-98. DOI: 10.3103/S0747923922010108
- van Laaten, M., Eulenfeld, T., & Wegler, U. (2022). Comparison of Multiple Lapse Time Window Analysis and Qopen to determine intrinsic and scattering attenuation. *Geophysical Journal International*, 228(2), 913-926. DOI: 10.1093/gji/ggab390
- Sharov, N.V., Malovichko, A.A., & Shchukin, Yu.K. (Eds.). (2007). *Zemletriaseniia i mikroiseismichnost' v zadachakh sovremennoi geodinamiki Vostochno-Evropeiskoi platformy. Kn. 2: Mikroiseismichnost'* [Earthquakes and microseismicity in the problems of modern geodynamics of the East European platform. V. 2: Microseismicity]. Petrozavodsk, Russia: Karelian SCRAS Publ., 96 p. (In Russ.). EDN: QKGNRR
- Zvereva, A.S., Sobisevich, A.L., & Likhodeev, D.V. (2023). Moment and local magnitudes calibration for earthquakes in the Northwest Caucasus. *Doklady Earth Sciences*, 507(S2), S304-S312. DOI: 10.1134/S1028334X2260116X

Information about authors

Predein Petr Alekseevich, PhD, Researcher of the Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (GIN SB RAS); Engineer of the Buryat Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (BuB GS RAS), Ulan-Ude, Russia. E-mail: crmpeter@ginst.ru

Khritova Mariya Anatolyevna, PhD, Head of Sector of the Baikal Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (BB GS RAS); Researcher of the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IEC SB RAS), Irkutsk, Russia. E-mail: hritova@crust.irk.ru