

ДОБРОТНОСТЬ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ВОСТОЧНОЙ ЗОНЫ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

© 2024 г. А. С. Зверева¹, *, А. Л. Собисевич², И. П. Габсатарова³

¹Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба РАН”, г. Пермь, Россия

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

³Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба РАН”, г. Обнинск, Россия

*E-mail: zvereva.as59@gmail.com

Поступила в редакцию 20.04.2023 г.

После доработки 21.06.2023 г.

Принята к публикации 22.06.2023 г.

Для восточной зоны Северного Кавказа, включающей в себя Терско-Каспийский прогиб, Дагестанский клин и прилегающие структуры, с максимальным охватом данных федеральной сети сейсмологических наблюдений ЕГС РАН, методом огибающей кода-волн определены региональные частотно-зависимые соотношения для оценки значений сейсмической добротности земной коры и верхней мантии. В общей сложности, с помощью модуля “Coda Q” программного комплекса SEISAN [Havskov et al., 2020] проанализированы волновые формы 394 коровых землетрясений с глубинами очага от 1 до 42 км и магнитудами от 2.2 до 5.5. Приведено подробное описание методики оценки сейсмической добротности с использованием модели однократного рассеяния, а также рекомендации практического использования полученных оценок, характеризующих волновые свойства разномасштабных объемов разломно-блоковой геологической среды, для внесения поправок за затухание при расчете спектральных параметров очагов землетрясений восточной зоны Северного Кавказа. Результаты исследования призваны содействовать повышению информативности каталогов землетрясений, в частности — их наполнению данными об энергетических характеристиках сейсмических событий (универсальными значениями моментных магнитуд M_w) в наиболее сейсмоактивных регионах нашей страны.

Ключевые слова: добротность геофизической среды, кода-волны, спектральные параметры очагов сильных землетрясений, скалярный сейсмический момент, моментная магнитуда.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724010091>, EDN: EGQDQF

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое экономическое развитие южных регионов Российской Федерации неразрывно связано с решением вопросов обеспечения безопасности жизнедеятельности в случае реализации вероятных сценариев возникновения и развития природно-техногенных катастроф, обусловленных опасными эндогенными процессами. Понимание причин их возникновения, глубинных механизмов, территориального распространения и повторяемости во многом зависит от уровня организации междисциплинарных систем геофизических инструментальных наблюдений, развернутых на исследуемой территории с целью контроля состояния геологической среды и ее возможных изменений. В качестве объекта исследования рассмотрим

восточное крыло Северного Кавказа — один из наиболее уязвимых в отношении сейсмической опасности регионов нашей страны (рис. 1).

На данном участке Альпийско-Гималайского подвижного пояса геодинамическая обстановка в значительной степени контролируется условиями коллизии Евразийской и Аравийской литосферных плит, ответственными за всю совокупность разномасштабных сеймотектонических процессов в неоднородной геологической среде [Philip et al., 1989; Ershov et al., 2003; Koulikov et al., 2012; Собисевич и др., 2015; Milyukov et al., 2015; Kaban et al., 2018; Лукк, Шевченко, 2019; Ismail-Zadeh et al., 2020; Трифонов и др., 2020; Rogozhin et al., 2020; Магомедов, Мамаев, 2022]. Основные сейсмогенерирующие структуры региона представлены крупнейшими шовными

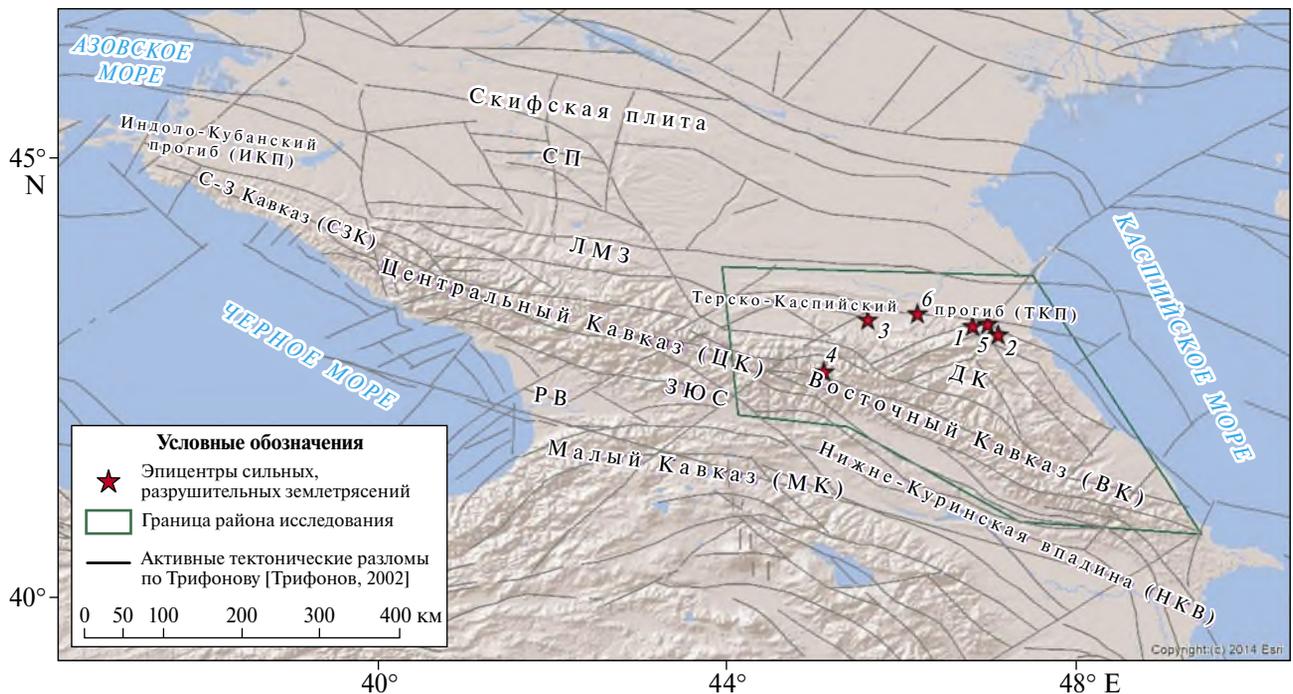


Рис. 1. Основные тектонические структуры Кавказа и сопредельных территорий [Рогожин и др., 2014]: СП – Ставропольское поднятие; ЛМЗ – Лабино-Малкинская зона; ДК – Дагестанский клин; ТКП – Терско-Каспийский прогиб; РВ – Рионская впадина; СЗК – Северо-Западный Кавказ; ЗЮС – зона южного склона. Звездочки – эпицентры сильных землетрясений: 1 – Дагестанское-I (1830 г., $M = 6.3$, с интенсивностью в эпицентре $I_0 = 8-9$ баллов); 2 – Дагестанское (1970 г., $M = 6.6$, $I_0 = 9$ баллов); 3 – Черногорское (1976 г., $M = 6.2$, $I_0 = 8-9$ баллов); 4 – Барисахское (1992 г., $M = 6.3$, $I_0 = 7-8$ баллов); 5 – Кизилюртское (1999 г., $M_w = 5.7$, $I_0 = 7$ баллов); 6 – Курчалойское (2008 г. $M_w = 5.8$, $I_0 = 8$ баллов).

зонами и узлами их пересечения, определяемыми системами активных разломов общекавказского, поперечного (северо-восточного) и диагонального (северо-западного) простирания [Несмеянов, 2012; Рогожин и др., 2014; Магомедов, Мамаев, 2022].

Вопросам региональной специфики затухания сейсмических волн и соответствующих оценок добротности посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных авторов [Aki, Chouet, 1975; Копничев, 1975; Раутиан и др., 1981; Navskov et al., 1989; Ibanez et al., 1990; Абубакиров, 2005; Dasovic et al., 2013; Гусев, Гусева, 2016; Сычева, Сычев, 2017; Voга et al., 2017; Giampiccolo et al., 2018; Добрынина и др., 2019; Кирсанов, Павленко, 2019; Копничев, Соколова, 2019; Аптикаева, 2020; и др.]. Особо отметим результаты оценки сейсмической добротности Байкальской рифтовой зоны [Добрынина и др., 2016], полученные с использованием программного комплекса SEISAN [Navskov et al., 2020].

Помимо геометрического расхождения и энергетических потерь на внутреннее трение в реальной геологической среде, затуханию сейсмических

волн во многом способствует рассеяние энергии на разномасштабных локальных неоднородностях, обладающих резонансными свойствами и в совокупности определяющих добротность среды Q , значения которой оцениваются по мере уменьшения амплитуд кода-волн (“метод огибающих”) в “хвостах” сейсмограмм местных землетрясений.

Полученные таким образом значения добротности обозначаются Q_c (добротность “по коду” или “coda Q ”). Поскольку в коде (особенно на высоких частотах) преобладают S -волны, естественно предположить, что добротность “по коду” Q_c учитывает вклад процессов рассеяния (Q_{sc}) и поглощения (Q_i) для S -волн согласно работам [Aki, Chouet 1975; Копничев, 1975; Раутиан, и др., 1981; Sato et al., 2012]. В то же время развиваются методы, позволяющие разделить Q_{sc} и Q_i . Так, в работе [Shapiro et al., 2000] было показано, что на удалениях до 100 км преобладает значение Q_{sc} , а далее – Q_i . Эффекты рассеяния доминируют и в оценках значений добротности по коду сейсмограмм от близких землетрясений на частотах менее 6 Гц [Mayeda et al., 1991]. При использовании метода нормализации по коду [Aki, 1980; Sato et al., 2012] не учитываются

модели рассеяния, используемые для описания природы кода-волн, и, следовательно, полученные результаты не могут быть напрямую сопоставлены Q_c . Нередко для оценки добротности по региональным сейсмограммам анализируется код Lg -волн [Xie et al., 1988]. Наконец, в методе “временного окна с несколькими интервалами” (MLTWA) [Fehler et al., 1992; Абубакиров, 2005] используются как S -волны, так и кода-волны для отдельного определения компонент, обусловленных поглощением Q_i и рассеянием Q_{sc} с последующим суммированием. В целом же, сейсмическая добротность содержит усредненные сведения о физических свойствах ограниченного объема геологической среды, где происходит процесс распространения, затухания и рассеяния сейсмических волн [Gupta et al., 1998; Pulli, 1984]. Наиболее часто используется методика, основанная на модели однократного рассеяния, из-за простоты и легкости применения. Считается, что эта модель больше подходит для небольших локальных землетрясений [Ibanez et al., 1990].

Постоянное развитие и поддержка отечественных сетей сейсмологических наблюдений в районах сейсмической и вулканической опасности закономерно способствовали снижению энергетического уровня уверенно регистрируемых землетрясений [Маловичко и др., 2020]. Это позволило накопить достаточный объем экспериментальных данных для проведения системных и систематических исследований процессов затухания сейсмических волн в слоистой геофизической среде восточной зоны Северного Кавказа, результаты которых позволяют не только оценить ее упругие и рассеивающие свойства, но в перспективе и отслеживать изменения контролируемых параметров с течением времени. Таким образом, целью настоящего исследования являлось получение частотно-зависимой добротности литосферы с использованием модели однократного рассеяния методом огибающих кода-волн.

ИЗУЧЕННОСТЬ РЕГИОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования условий затухания S -волн и расчеты частотно-зависимой добротности земной коры и верхней мантии на Кавказе проводились ранее с целью оценки сейсмической опасности, сейсмостойкости зданий и сооружений [Павленко, 2008; 2010; 2016; 2020; Павленко, Павленко, 2016; Харазова и др., 2016; Кромский и др., 2018; Кирсанов, Павленко,

2020]. Посредством численного моделирования волновых форм местных землетрясений и их последующего сравнения с реальными сейсмограммами, полученными на станциях “Сочи”, “Анапа”, “Кисловодск” и “Махачкала” были определены частотно-зависимые значения добротности геофизической среды для каждой из названных станций в полосе частот от 1 до 8 Гц. Далее, методом “нормализации по коду” были получены оценки добротности в ходе обработки записей сорока двух землетрясений с эпицентральными расстояниями до ~200 км и магнитудами от 2.4 до 5.8 на сейсмостанции “Махачкала”. Спектральные амплитуды S -волн и коды рассчитывались в семи частотных диапазонах, в полосе 1–18.5 Гц с использованием трехсегментной функции геометрического расхождения на удалениях до 50, от 50 до 150 и более 150 км. Полученные оценки позволяют рассчитывать параметры сильных движений в г. Махачкала и его окрестностях [Павленко, 2020].

Изучению поглощения S -волн вдоль трасс, пересекающих очаговые зоны сильных ($M \geq 4$) землетрясений на удалениях 200–700 км от сейсмостанции “Кисловодск” посвящены работы [Копничев, Соколова, 2019; Аптикаева, 2020].

На основании данных, полученных методом картирования поля поглощения в литосфере по отношению максимальных амплитуд волн S_n и P_n , через параметр $\lg(AS_n/AP_n)$ прослежена связь механизмов очагов сильных землетрясений с напряженно-деформированным состоянием слоистой геофизической среды [Копничев, Соколова, 2019]. Отдельного упоминания заслуживают сделанные ранее цитируемыми авторами выводы об относительно высоком содержании флюидов в верхах мантии под очаговыми зонами на этапе подготовки сильных внутриконтинентальных землетрясений Кавказа.

Оценки поглощения поперечных волн по огибающим коды для землетрясений Кавказа получены в работе [Аптикаева, 2020], где подробно исследованы очаговые зоны Кизилюртского (1999 г.) и Курчалойского (2008 г.) землетрясений, произошедших в окрестностях эпицентральной зоны разрушительного Дагестанского землетрясения 1970 г. При этом значения добротности геофизической среды были рассчитаны в ограниченном диапазоне частот от 1 до 1.6 Гц, что не позволяло перейти к оценкам эффекта поглощения энергии S -волн в ходе приведения станционных спектров к очаговым с последующим определением динамических параметров очага.

В работе [Gök et al., 2016] для территории Ближнего Востока включая Малый Кавказ и восточную часть Большого Кавказа проведена оценка параметров очагов землетрясений методом расчета эмпирической огибающей кода-волн в 13 узких полосах частот в диапазоне от 0.03 до 8.0 Гц. В основе метода лежит расчет параметров калибровки коды при котором используются региональные широкополосные сейсмограммы скоростей с поправкой на амплитудно-частотные характеристики аппаратуры. В результате получают кодовые спектры скорости момента, которые привязаны к независимым моментам, смоделированным по форме волны. С помощью рассчитанных в данном исследовании одномерных калибровочных траекторий определяются магнитуды M_w на основе коды для большинства событий. Отдельно представлены рассчитанные очаговые параметры для события 01.07.2007 г. с эпицентром в пределах Азербайджана, рассчитаны индивидуальные станционные калибровочные параметры, в частности, для станции “Кисловодск”.

В основном, ранее выполненные исследования на Кавказе проводились, как правило, с использованием данных одиночных сейсмостанций и записей наиболее сильных землетрясений.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходные данные представлены волновыми формами 394 коровых землетрясений (глубина очага от 1 до 42 км) с магнитудами 2.2–5.5, которые были зарегистрированы сейсмостанциями ФИЦ ЕГС РАН в период с 2016 по 2022 гг. (рис. 2).

Сейсмостанции ФИЦ ЕГС РАН восточной зоны Северного Кавказа по большей части оснащены современными короткопериодными и широкополосными сейсмометрами, обеспечивающими уверенную регистрацию землетрясений с $M_L \geq 1.5$ на исследуемой территории, а в отдельных ее областях – с $M_L \geq 1.0$ [Лутиков и др., 2021]. Таким образом, все анализируемые нами сейсмические события имели представительный уровень магнитуд, а их основные параметры были определены по данным региональных сетей сейсмологических наблюдений Северо-Осетинского (NOGSR) и Дагестанского (DAGSR) филиалов ФИЦ ЕГС РАН, а также Центрального отделения (OBGSR) в Обнинске [Габсатарова и др., 2022].

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДОБРОТНОСТИ

Для определения добротности геофизической среды по кода-волнам применяются методы из работ [Aki, Chouet, 1975; Раутиан, 1981],

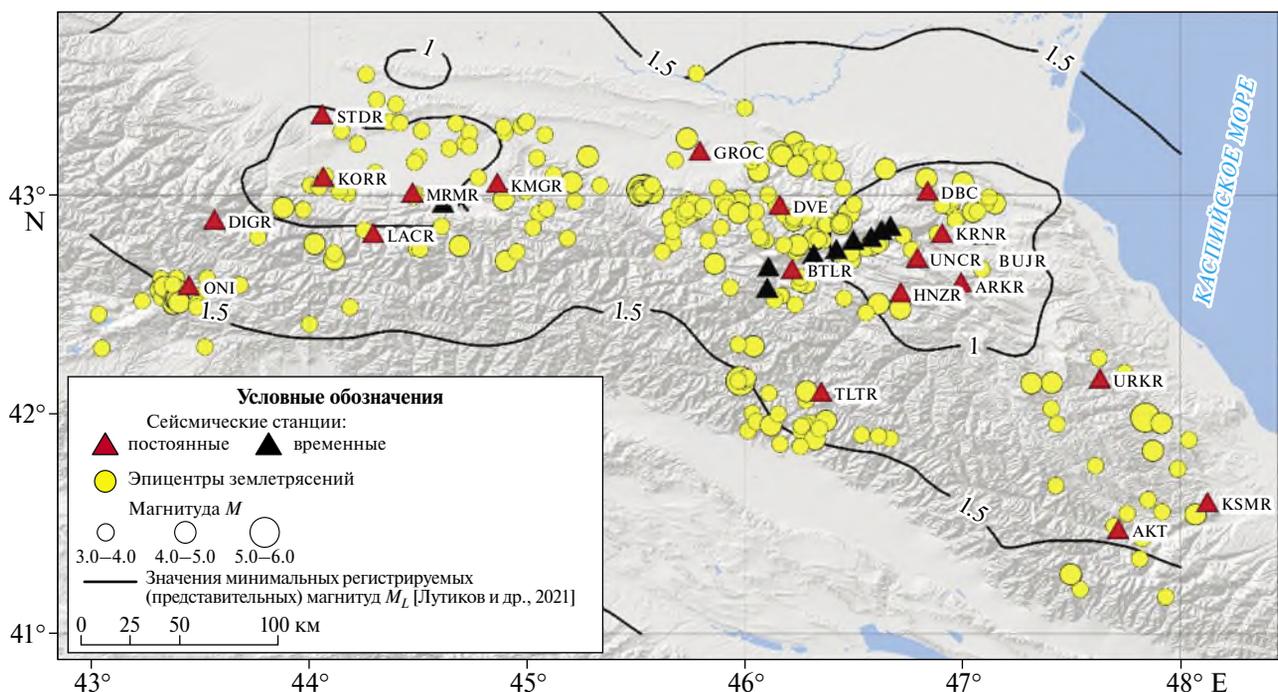


Рис. 2. Карта расположения сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН на Северном Кавказе и эпицентров землетрясений 2016–2022 гг., используемых в работе. Изолинии локальных магнитуд ограничивают области представительной регистрации сейсмических событий [Лутиков и др., 2021].

в основе которых лежит принцип подавления эффектов источника излучения и локальных эффектов в спектрах поперечных волн с помощью кода-волн, измеренных на фиксированном интервале времени с момента первого вступления. При этом используется модель однократного рассеяния, когда кода-волны представляются в виде суперпозиции объемных волн, отраженных от случайно распределенных неоднородностей, а для устранения эффектов направленности излучения проводится усреднение по множеству событий с очагами, расположенными в широком диапазоне азимутов относительно точки приема.

Оценивая значения добротности по кода-волнам в окне с переменным временем его начала, можно составить общее представление о строении слоистой геофизической среды на различных глубинах.

Амплитуды кода-волн в модели однократного рассеяния могут быть представлены в следующем виде [Aki, Chouet, 1975]:

$$A(f, t) = t^{-\beta} A_0 e^{-\pi f k} e^{\frac{-\pi f t}{Q(f)}}, \quad (1)$$

где: k – коэффициент приповерхностного затухания; A_0 – начальная амплитуда; β – коэффициент геометрического расхождения, равный 1.0 для объемных и 0.5 для поверхностных волн соответственно.

Логарифмирование соотношения (1) дает:

$$\ln(A(f, t)) + \beta \ln(t) = \ln(A_0) - \pi f k - \frac{t f \pi}{Q(f)}. \quad (2)$$

Здесь огибающая $\ln(A(f, t)) + \beta \ln(t)$ как функция времени от заданной частоты f (в соответствии с полосой пропускания фильтра) является прямой линией с наклоном $-\pi f / Q(f)$, по которому и определяется добротность $Q_c(f)$.

Согласно работе [Раутиан и др., 1981] время начала окна коды должно превосходить, как минимум, вдвое время пробега S -волны. Установлено [Aki, Chouet, 1975; Sato et al., 2012], что поскольку в коде преобладают S -волны, то и добротность Q_c , рассчитанная по коде, включает в себя компоненты рассеяния (Q_{sc}) и поглощения (Q_i) S -волн:

$$Q_c^{-1} = Q_{sc}^{-1} + Q_i^{-1}, \quad (3)$$

и имеет частотную зависимость:

$$Q_c = Q_0 (f / f_0)^\alpha, \quad (4)$$

где Q_0 – добротность на опорной частоте f_0 и α – параметр, значения которого менее 0.5 для стабильных регионов, в диапазоне 0.3–0.8 для областей с умеренной тектонической активностью; более 0.8 для тектонически активных регионов [Havskov et al., 2016]. На практике [Havskov, Ottemöller, 2010] опорная частота устанавливается равной 1 Гц. Существуют разные точки зрения относительно значений параметра затухания Q при $f < 1$ Гц. Одни исследователи утверждают, что он снова начинает увеличиваться в диапазоне частот 0.1–1 Гц, однако принято считать, что он не изменяется в данной полосе частот. Таким образом, зависимость (4) приобретает вид:

$$Q_c = Q_0 f^\alpha. \quad (5)$$

Следуя работам [Ризниченко и др., 1976; Пустовитенко, Пантелеева, 1990; Абубакиров и др., 2018], будем использовать модель очага Дж. Брюна [Brune, 1970], которая широко применяется в региональных исследованиях и согласуется с данными натуральных наблюдений [Havskov, Ottemöller, 2010]. Согласно этой модели спектр смещений очага (источника) $S(f)$ определяется как:

$$S(f) = \frac{M_0}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right] 4\pi\rho v^3}, \quad (6)$$

где: M_0 – сейсмический момент (Нм); ρ – плотность (кг/м³); v – скорость в очаге (м/с) (v_p или v_s в зависимости от типа спектра); f_c – угловая частота (Гц).

На низких частотах в очаговом спектре отмечается плато, уровень которого пропорционален M_0 , а далее амплитуды спектральных компонент линейно убывают по мере приближения к угловой частоте ($f = f_c$), на которой амплитуда вдвое меньше уровня плато.

В стационарный спектр смещений D вносится поправка за геометрическое расхождение и неупругое затухание, после чего он используется для получения параметров угловой частоты f_c и уровня плато Ω_0 (м·с):

$$D(f) = \frac{\Omega_0}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right]} = \frac{M_0 \times 0.6 \times 2.0}{4\pi\rho v^3 \left[1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right]}. \quad (7)$$

Уровень плато Ω_0 определяется как полный вектор смещения S -волн (м·с), приведенный к условиям однородного упругого полупространства.

Далее вычисляется сейсмический момент M_0 : [Havskov et al., 2020] с использованием набора

$$M_0 = \frac{\Omega_0 4\pi r v^3}{0.6 \times 2.0 \times G(\Delta, h)}. \quad (8)$$

Моментная магнитуда M_w рассчитывалась по формуле [Kanamori, 1977]:

$$M_w = 2/3(\lg M_0) - 6.06. \quad (9)$$

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Значения Q_c были рассчитаны в приложении “Coda Q” программного комплекса SEISAN

[Havskov et al., 2020] с использованием набора исходных параметров, полученных ранее в работах [Havskov et al., 2016; Zvereva et al., 2023], в том числе и для территории Западного Кавказа. Поскольку значения добротности по коде существенно зависят от выбора длительности окна коды (CW), времени его начала (LT), минимально допустимого коэффициента корреляции и ширины полосы применяемого фильтра [Baskoutas, 1996; Havskov, 1989], то для сравнения полученных результатов с данными других исследований важна идентичность перечисленных параметров.

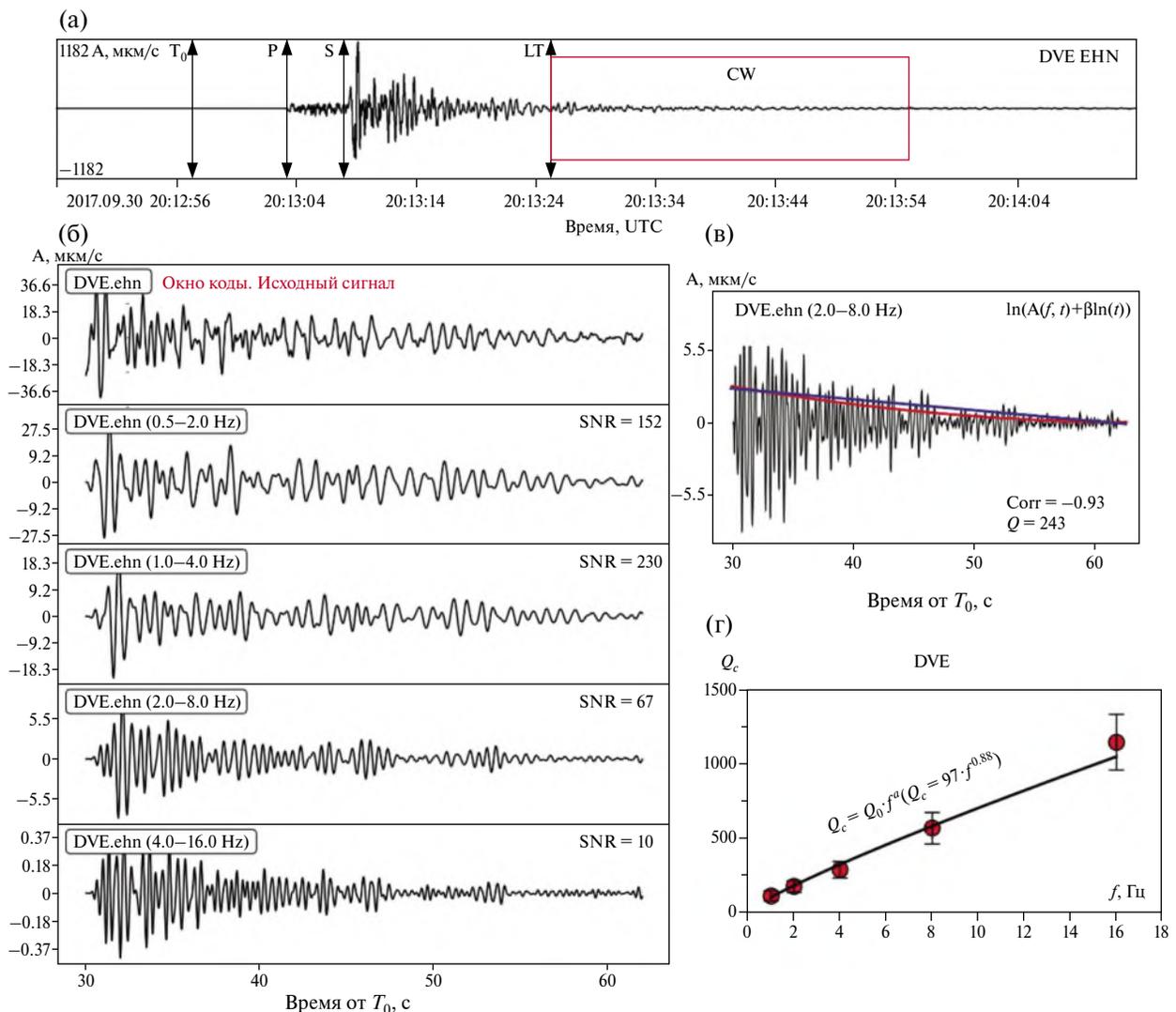


Рис. 3. Процесс обработки данных модулем “Coda Q” программного комплекса SEISAN для оценки частотно-зависимых значений добротности Q_c : (а) – исходная сейсмограмма в пункте наблюдения Дышне-Ведино (DVE) с отметками времен вступления P - и S -волн, времени в очаге (T_0), времени начала окна коды (LT), а также длительности окна коды (CW); (б) – окно коды (CW) исходного сигнала и результатов полосовой фильтрации; (в) – огибающая кода-волн в полосе частот 2.0–8.0 Гц, $\text{Corr} = -0.93$ – коэффициент корреляции с линией аппроксимации; (г) – среднее значение Q_c на каждой центральной частоте со стандартными отклонениями и аппроксимирующей степенной функцией.

Следуя работе [Havskov et al., 2016] для поверхностных волн, было установлено значение коэффициента геометрического расхождения $\beta = 0.5$, а для объемных волн $\beta = 1.0$, согласно работам [Ibanez et al., 1990; Dasovic et al., 2013; Bora et al., 2017; Giampiccolo et al., 2018]. Также и длительность окна коды (параметр CW на рис. 3а) была выбрана равной 30 с. Минимальное время начала окна коды (параметр LT на рис. 3а) ограничивалось двойным временем пробега S -волн (в противном случае сейсмическое событие не принималось в расчет), что позволяло усреднять значения, полученные на различных сейсмостанциях. Таким образом, начало расчетного интервала относительно времени в очаге (T_0) для всех анализируемых событий составляло 30 с. Отметим, что на таких расстояниях частотный диапазон поперечных волн составляет 2–5 Гц.

Полученные фрагменты волновых форм коды были обработаны двухоктавным фильтром Баттерворта с использованием предустановленных полос пропускания [Havskov et al., 2016]: 0.5–2.0, 1–4, 2–8, 4–16 и 8–32 Гц с центральными частотами $f_0 = 1, 2, 4, 8$ и 16 Гц (рис. 3б), с учетом ограничений, накладываемых частотой оцифровки (40–50 Гц), используемой на большинстве кавказских сейсмостанций. Далее рассчитывались значения отношения сигнал/шум (параметр SNR на рис. 3б) посредством сравнения трехсекундных среднеквадратичных амплитуд колебаний в конце отфильтрованного фрагмента и в естественном шуме, предшествующем сейсмическому событию. Для дальнейшего анализа использовались данные со значениями отношения сигнал/шум более трех.

Затем, для каждой полосы частот путем вычисления среднеквадратичных значений в скользящем окне длительностью пять циклов строилась огибающая коды, а также распределение значений логарифма амплитуд коды-волн с последующей линейной аппроксимацией по методу наименьших квадратов и определением коэффициента корреляции (параметр “Corr” на рис. 3в).

В общей сложности в расчетах были задействованы данные 29 различных сейсмостанций и получено 5289 и 4912 значений Q_c (при $\beta = 0.5$ и 1.0 соответственно). Значения Q_c оценивались для каждой сейсмостанции и центральной частоты (рис. 3г, табл. 1). С использованием аппроксимирующей частотно-зависимой степенной функции, для каждой сейсмостанции определялось соотношение $Q_c = Q_0 \cdot f^\alpha$.

По результатам анализа всех имеющихся сейсмограмм восточной части Северного Кавказа представляется возможным оценить средние значения Q_c следующими соотношениями:

$$Q_c = 76 \pm 15 \cdot f^{0.89 \pm 0.1} \text{ при } \beta = 0.5 \quad (10)$$

$$Q_c = 97 \pm 21 \cdot f^{0.88 \pm 0.11} \text{ при } \beta = 1.0. \quad (11)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В принятой нами модели однократного рассеяния рассмотрим эллипсоидальный объем геологической среды, в фокусах которого расположены очаг землетрясения и сейсмостанция (рис. 4) [Gupta et al., 1998; Pulli, 1984; Havskov, Ottmöller, 2010], при этом его большая и малая полуоси составляют соответственно:

$$a = \frac{vt}{2}, \quad b = \sqrt{a^2 - \frac{r^2}{4}}, \quad (12)$$

где: r – среднее гипоцентральное расстояние; v – скорость S -волн; $t = (LT + CW/2)$ – среднее время прихода коды-волн.

Нижняя граница эллипсоида соответствует максимальной глубине проникновения коды-волн:

$$h = h_{av} + b, \quad (13)$$

где h_{av} – средняя гипоцентральная глубина событий (в наших данных $h_{av} = 11$ км).

Расчетные значения Q_c соотносятся с “средними точками”, представляющими собой проекции на поверхности центра эллипсоида. Итоговое распределение средних точек Восточной зоны Северного Кавказа показано на рис. 5.

Считается, что мантия более однородна, чем земная кора, мощность которой на Кавказе составляет ~ 50 км [Краснопевцева, 1984], за счет закрытия трещин в структуре относительно пластичного вещества при возрастающих давлениях и температурах [Dasovic et al., 2013]. Поскольку оценка степени влияния физических свойств вещества в мантии на сейсмологические данные выходит за рамки настоящего исследования, было принято решение ограничить время начала окна коды (30 с), а интерпретацию результатов проводить с использованием модели одиночного рассеяния. Учитывая среднюю скорость S -волн (3.4 км/с), длину окна коды (30 с), среднее гипоцентральное расстояние (28 км), время начала окна коды (30 с), получается, что волны, составляющие коду, распространяются

Таблица 1. Значения Q_0 и α , рассчитанные с использованием аппроксимирующей частотно-зависимой степенной функции для коэффициента геометрического расхождения $\beta = 1$ по данным 29 сейсмостанций восточной части Северного Кавказа

Индекс сейсмостанции	Q_0	$SD(Q_0)$	α	$SD(\alpha)$	N
АКТ	78	10	1.11	0.09	78
ARKR	106	22	0.85	0.14	79
BTLR	95	24	0.96	0.17	380
BUJR	91	19	0.76	0.16	78
D03	93	19	0.94	0.12	189
D04	99	20	0.85	0.14	143
D05	98	25	0.87	0.17	118
D06	100	21	0.90	0.16	224
D07	111	30	0.80	0.17	86
D08	94	19	0.98	0.15	194
D09	100	21	0.80	0.15	83
D10	103	23	0.94	0.15	85
DBC	95	20	0.95	0.15	171
DIGR	88	12	0.86	0.07	232
DVE	97	20	0.88	0.10	784
GROC	102	23	0.87	0.11	294
HNZR	94	23	0.85	0.23	54
KMGR	92	21	0.92	0.17	133
KORR	98	23	0.76	0.18	182
KRNR	97	21	0.81	0.15	175
KSMR	89	19	0.94	0.15	57
LACR	82	25	1.03	0.22	165
MRMR	78	21	1.08	0.14	80
ONI	89	12	0.87	0.06	108
R05	88	21	0.95	0.16	108
STDR	97	26	0.74	0.17	93
TLTR	117	30	0.91	0.23	202
UNCR	102	27	0.84	0.17	216
URKR	100	19	0.86	0.11	66

Примечания: SD – средноквадратическое отклонение; N – общее количество значений Q_c на всех частотах.

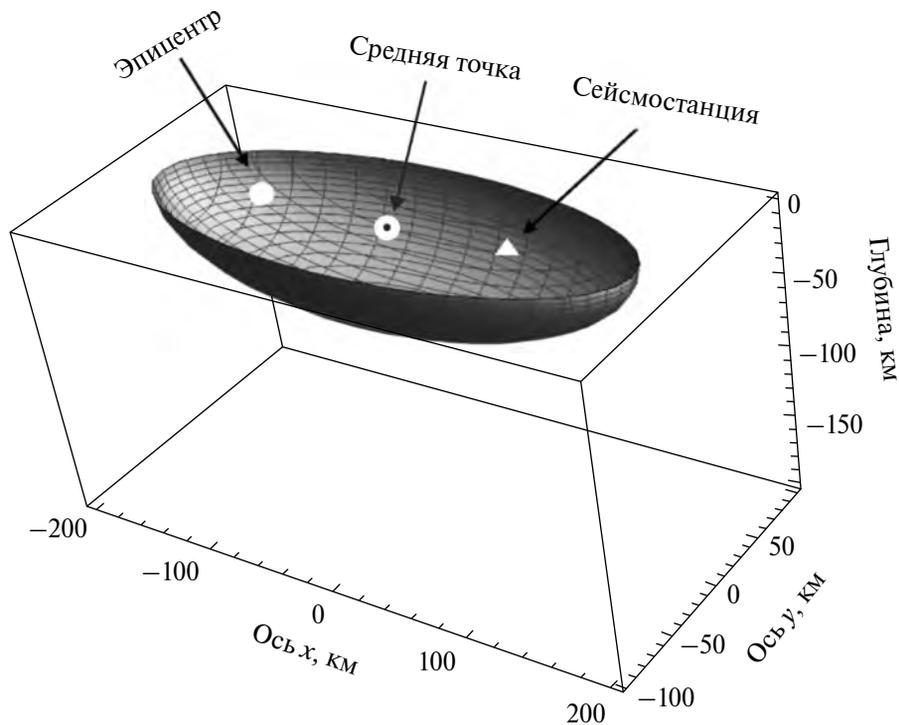


Рис. 4. Эллипсоид рассеяния в случае расположения источника и приемника сейсмических волн на дневной поверхности на расстоянии 230 км друг от друга (длина окна коды не более 100 с) [Pezzo, Ibanez, 2020].

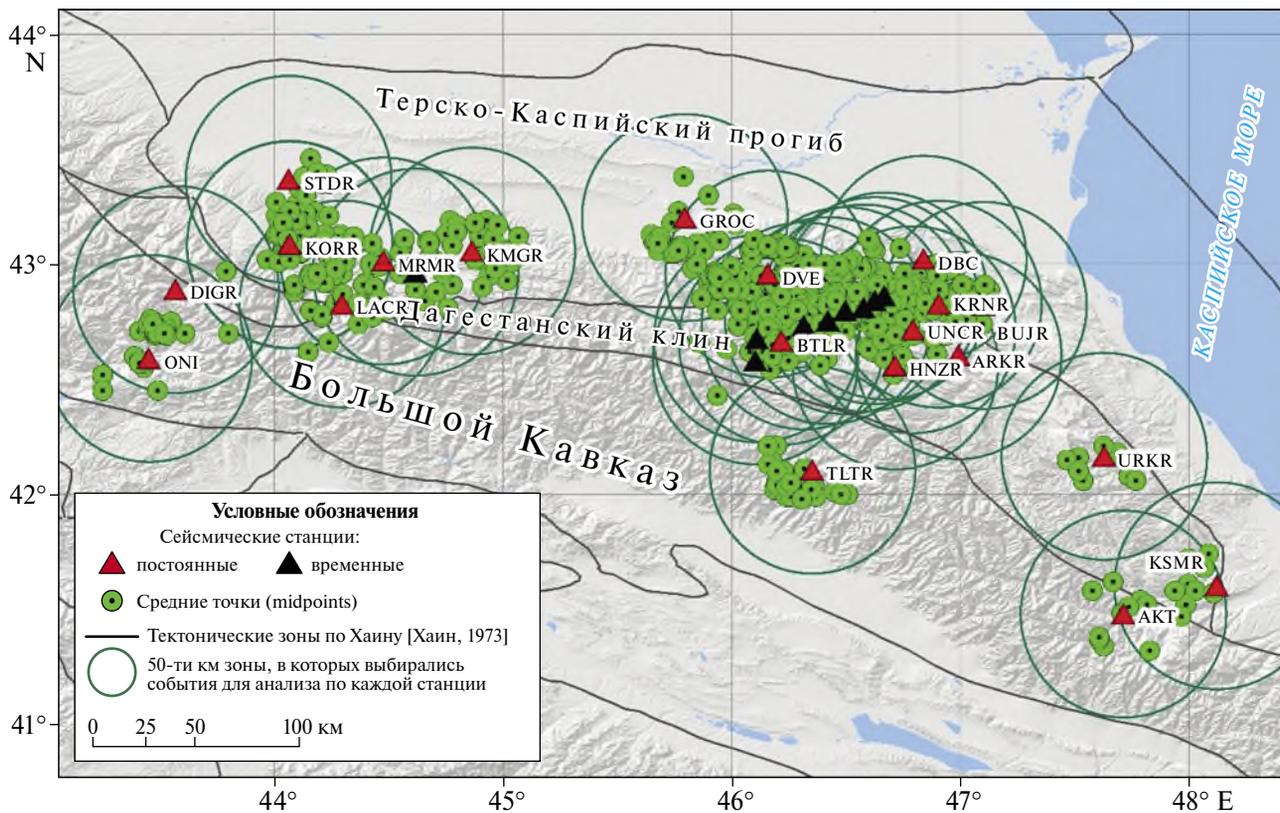


Рис. 5. Карта распределения средних точек Восточной зоны Северного Кавказа.

согласно (12) внутри эллипса с радиусами главной и малой осей, равными 77 и 76 км соответственно. В этом случае, максимальная теоретическая глубина проникновения, исходя из (13), составляет 87 км.

Заметная неравномерность распределения средних точек на дневной поверхности обусловлена как расположением сейсмостанций, так и естественными особенностями сейсмичности зон Терско-Каспийского прогиба (ТКП) и Дагестанского клина (ДК).

Расчеты Q_c в пределах этих тектонических структур, а также Большого Кавказа (БК) проводились таким образом, чтобы эпицентры землетрясений и средние точки эллипсоида объема среды, охваченного кода-волнами, находились в пределах тектонических границ изучаемой зоны, а эпицентральные расстояния не превышали 50 км.

В табл. 2 приведены результаты расчета Q_c для каждой из зон и на каждой центральной частоте, а также общая частотная зависимость степенных функций Q_c (рис. 6а).

Таблица 2. Значения Q_c для каждой центральной частоты и частотно-зависимые степенные функции $Q_c(f)$ в каждой зоне

Зона	Центральная частота f , Гц										N	$Q_c = Q_0 \pm SD \cdot f^{\alpha \pm SD}$
	1	N	2	N	4	N	8	N	16	N		
ТКП	113	347	180	315	291	216	592	155	1183	71	1104	$Q_c = 103 \pm 21 \cdot f^{0.85 \pm 0.1}$
БК	84	98	160	110	300	113	592	73	954	25	419	$Q_c = 86 \pm 17 \cdot f^{0.89 \pm 0.09}$
ДК	96	216	178	273	352	228	675	135	—	—	862	$Q_c = 95 \pm 18 \cdot f^{0.94 \pm 0.09}$

Примечания: SD – стандартное отклонение, N – общее количество значений Q_c для каждой центральной частоты.

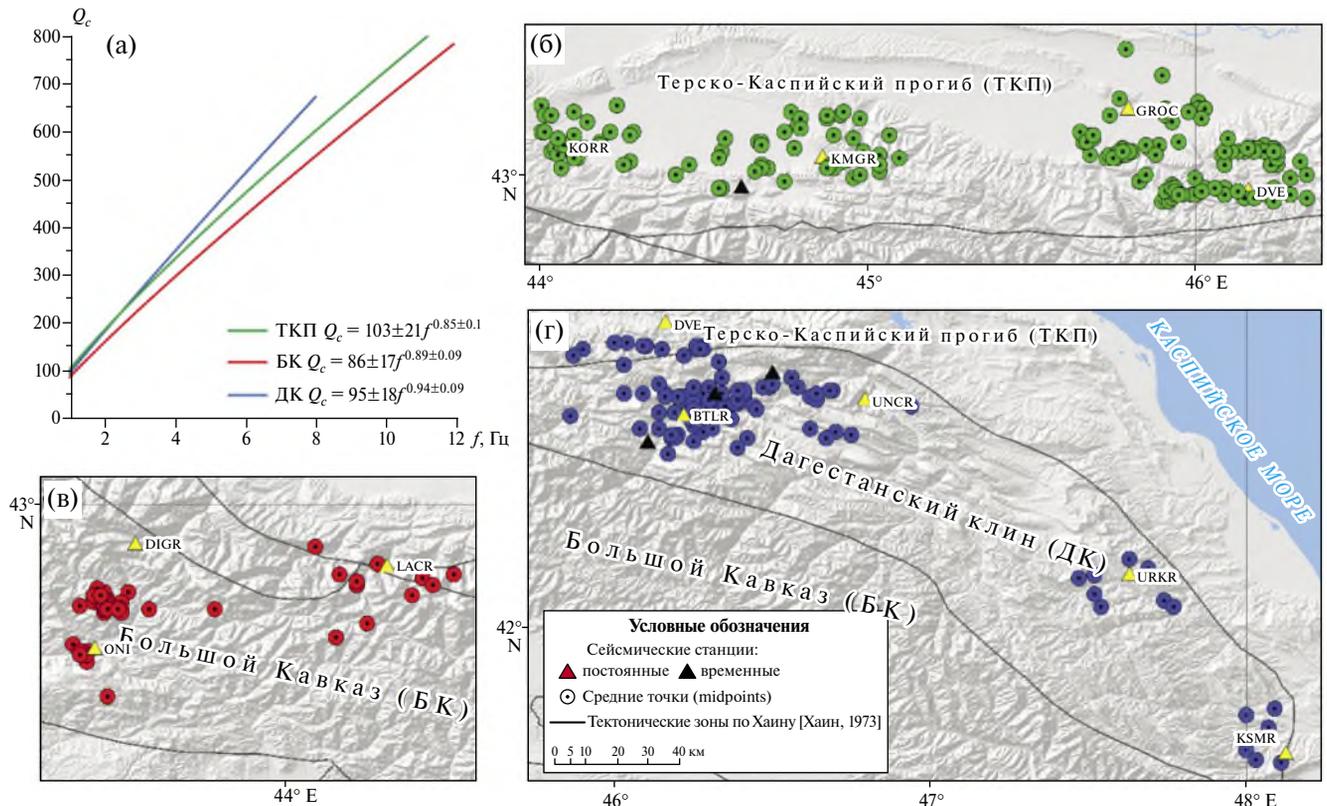


Рис. 6. (а) – зависимости $Q_c(f)$ для исследуемых зон Терско-Каспийского прогиба, Большого Кавказа и Дагестанского клина, а также карты распределения средних точек в пределах каждой из зон (б), (в), (г) соответственно.

Наибольшие расхождения между всеми тремя зонами наблюдаются в низкочастотной области на центральной частоте 1 Гц, где основные потери энергии обусловлены крупномасштабными неоднородностями. Согласно работам [Aki, Chouet, 1975; Aki, 1980; Копничев, 1978; Раутиан и др., 1981] кода-волны на частоте около 1 Гц формируются в верхней части литосферы с более низкой добротностью, а в короткопериодном диапазоне это — объемные волны обратного рассеяния от глубинных неоднородностей.

Для зоны ТКП, которая в тектоническом плане занимает промежуточное положение между южной частью Скифской плиты и горноскладчатым сооружением Большого Кавказа, было получено наибольшее значение $Q_{1\text{Гц}} = 113$. Самые малые значения добротности $Q_{1\text{Гц}} = 84$ соответствуют восточному сегменту орогенного поднятия Большого Кавказа. Промежуточные между ТКП и БК значения добротности ($Q_{1\text{Гц}} = 96$) отмечены в пределах Дагестанского клина. Выявленные особенности соответствуют представлениям о повышенном затухании в тектонически активных, неоднородных и раздробленных структурах [Ibanez et al., 1990; Dasovic et al., 2013; Vora et al., 2017; Giampiccolo et al., 2018; Добрынина и др., 2019; и др.].

Представляется целесообразным использование средних значений частотно-зависимой добротности $Q_c(f)$ для внесения поправки за затухание в наблюдаемый спектр S -волн при расчете спектральных параметров очагов восточной зоны Северного Кавказа, поскольку на записях региональных землетрясений регистрируются S -волны с преобладающим периодом колебаний 0.2–0.3 с.

Видно (табл. 2), что для частот более 4 Гц различия зон ТКП и БК уменьшаются, да и в целом зональные зависимости $Q_c(f)$ достаточно близки (рис. 6).

Относительно слабое затухание в пределах ДК свидетельствует об уменьшении потерь энергии сейсмических колебаний на высоких частотах и незначительной концентрации мелкомасштабных неоднородностей в слоистой геофизической среде. При этом различия в значениях оценки затухания лежат в пределах ошибок определения $Q_{4\text{Гц}}$, которые достигают 62–75 единиц.

Сравнивая полученные результаты с аналогичными данными, полученными в работе [Navskov et al., 2016] для различных геотектонических обстановок, отметим, как правило, относительно низкие значения Q_c (менее 200) для тектонически активных регионов. Наши оценки

значений добротности наиболее близко могут быть соотнесены с результатами по характерной мелкофокусной сейсмичностью Аргентине, а также активной рифтовой системе Шаньси на севере Китая.

Если же провести сравнение с ранее достигнутыми результатами в южных регионах нашей страны, то преимущество настоящих определений состоит в том, что они получены для исследуемой территории с максимальным охватом имеющихся данных по числу землетрясений и зарегистрировавших их сейсмостанций.

РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Полученные оценки добротности неоднородной геофизической среды могут быть использованы для минимизации влияния затухания S -волн в стационарных спектрах, что позволяет непосредственно перейти к расчетам спектральных параметров очагов наиболее ощутимых за рассматриваемый период землетрясений Восточного Кавказа (рис. 7).

Впервые программный комплекс SEISAN [Navskov et al., 2020] был использован для оценки спектральных и динамических параметров очагов, соответственно, 8 и 40 региональных землетрясений за период 2016–2017 гг. [Малянова и др., 2022] и 2016–2021 гг. [Зверева и др., 2023] на территории Западного Кавказа по данным действующей сети сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН. Опробованная ранее методика применена и в настоящем исследовании.

Рассмотрим процедуру расчета спектральных параметров очага землетрясения в программном комплексе SEISAN на примере события 12.12.2020 г. (рис. 8).

Исходными данными являются сейсмограммы, полученные с нескольких станций (рис. 8а). Длительность анализируемого фрагмента волновой формы (SW , рис 8б) определяется как время от момента вступления S -волны до момента снижения амплитуды колебаний на треть от максимального значения. Последующий расчет спектров смещений S -волн (рис. 8в) выполняется в соответствии с ранее опробованной методикой [Зверева и др., 2023]. Отметим, что поправка за геометрическое расхождение задавалась в зависимости от расстояния и глубины согласно работе [Navskov et al., 2010], а влияние затухания на наблюдаемый спектр учитывалось посредством частотно-зависимой добротности

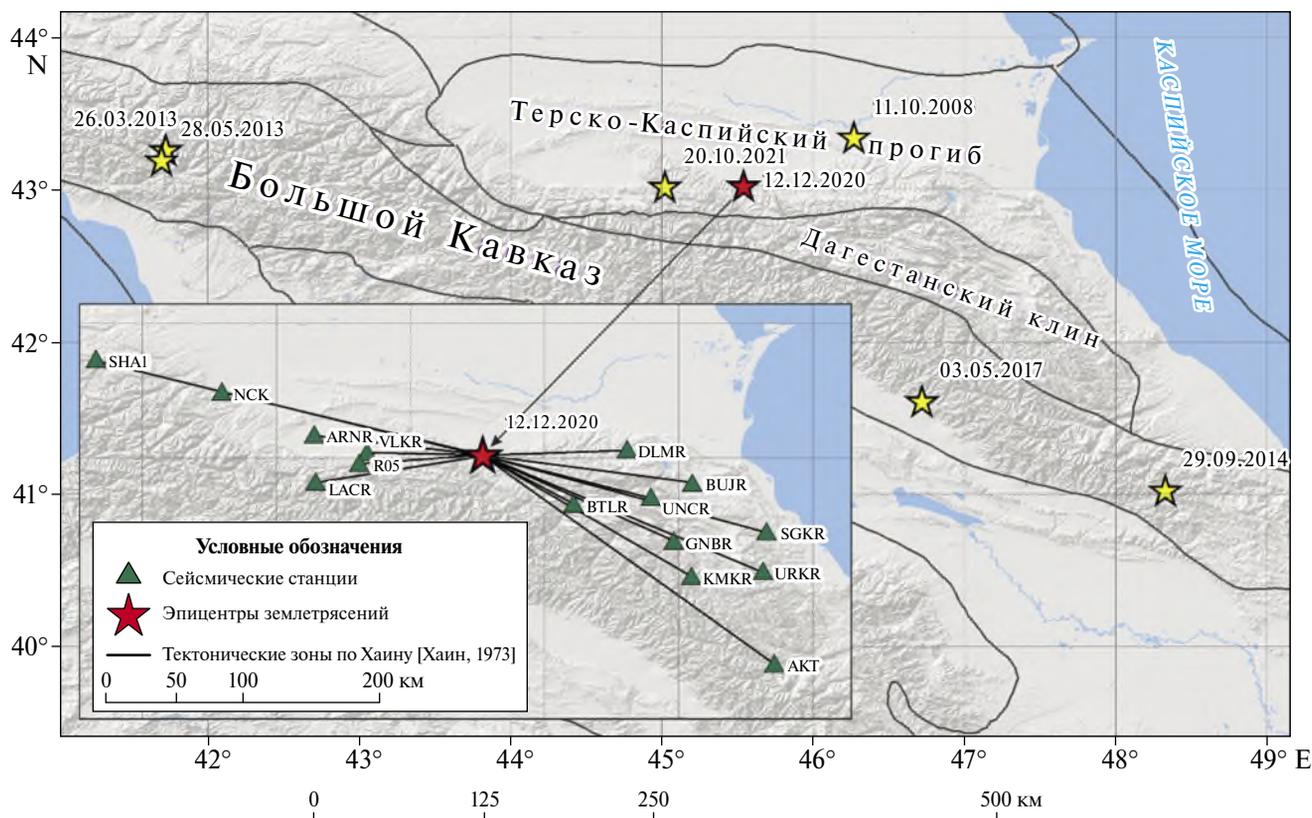


Рис. 7. Схема расположения региональных сейсмических станций и эпицентров землетрясений, использованных для расчета спектральных параметров их очагов.

среды Q ($Q = Q_0 \cdot f^\alpha$, при f более 1 Гц) и характеристики приповерхностного затухания k .

Если величина геометрического расхождения равна единице, то добротность геофизической среды восточной зоны Северного Кавказа, согласно (11) составляет $Q_c = 97 \pm 21 \cdot f^{0.88 \pm 0.11}$, а для двух землетрясений 26.03.2013 и 28.05.2013 г., расположенных в Чхалтинской сейсмоактивной зоне БК (рис. 7) $Q_c = 90 \pm 21 \cdot f^{1.02 \pm 0.11}$ [Zvereva et al., 2023]. Для всех проанализированных сейсмических событий значение угловой частоты f_c не превышало 4 Гц, а значение приповерхностного затухания задавалось постоянным и равным 0.02. Результаты расчета спектральных параметров наиболее сильных землетрясений представлены в табл. 3.

Эталоном для сравнения полученных оценок параметров очагов были приняты определения глобального каталога тензора сейсмического момента (СМТ) [The Global Centroid..., 2022], включая и значения скалярного сейсмического момента M_0 , рассчитанные согласно работе [Dziewonski et al., 1981]. Следует отметить, что в каталоге GСМТ приведены решения

с условием нулевого следа, поэтому при сравнении следует иметь в виду, что наши решения получаются для тензора сейсмического момента с условием двойного диполя без момента.

Таким образом, среднее значение разностей между “эталонными” и нашими магнитудными оценками составило 0.04, в то время как для значений магнитуд $M_w > 5.0$ наблюдается полное соответствие. Также была выполнена оценка среднего значения разностей между определением сейсмического момента M_0 , которая составила $1.0 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot 10^{16}$.

Несмотря на имеющиеся ограничения расчетной модели, поскольку она все-таки не учитывает вертикальной неоднородности коэффициента рассеяния, тем не менее, оценки затухания сейсмических волн с использованием частотно-зависимых значений добротности позволяют преобразовывать стационарные спектры смещений в очаговые и, в соответствии с моделью Брюна [Brune, 1970], определять скалярный сейсмический момент и другие динамические параметры очага.

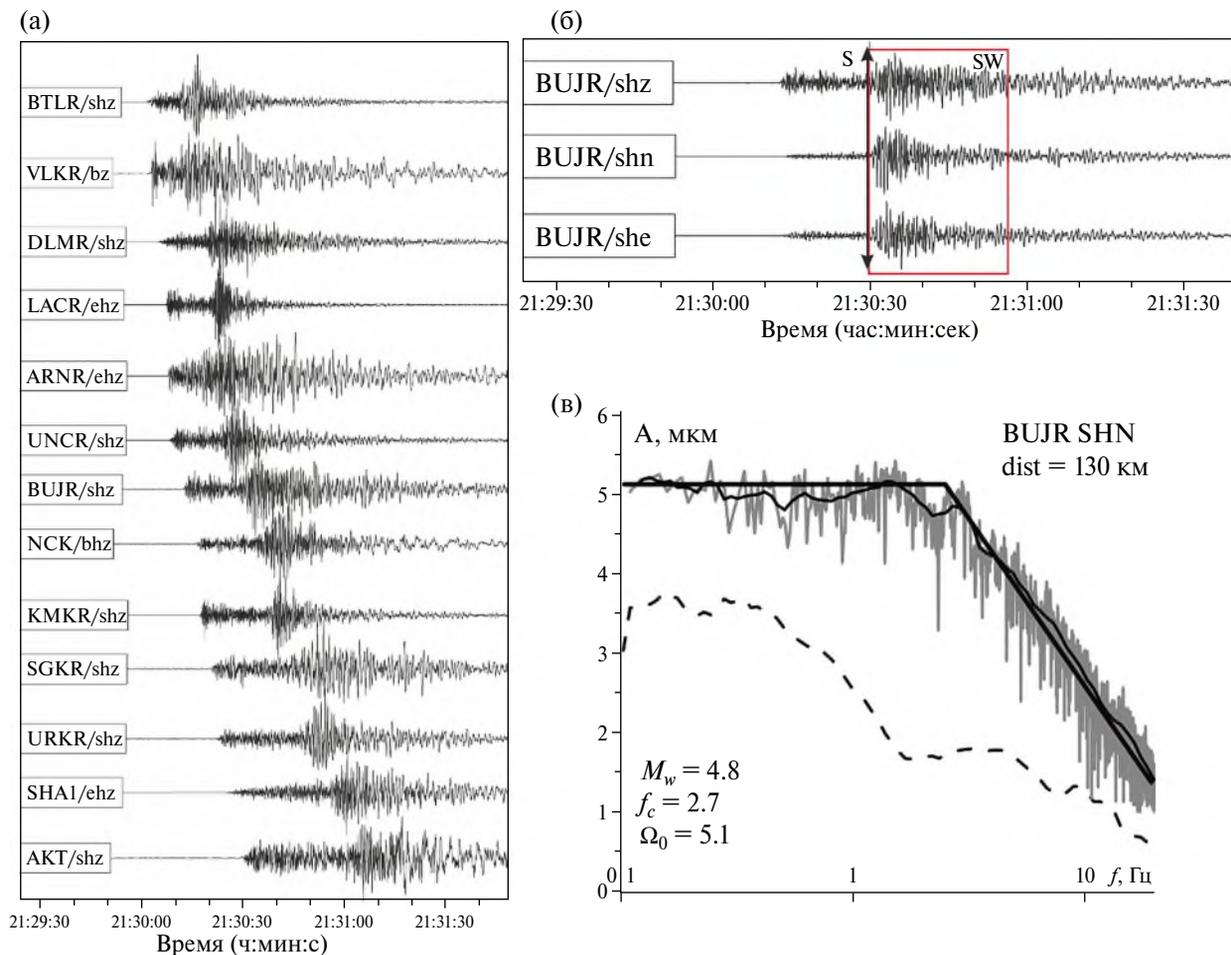


Рис. 8. Пример расчета спектральных параметров очага землетрясения 12.12.2020 г. в соответствии с моделью Брюна: (а) – исходные волновые формы; (б) – фрагмент сейсмограммы и временной интервал для расчета спектра смещений S-волн; (в) – пример аппроксимации полученного спектра смещений с поправками за затухание и геометрическое расхождение, пунктирная линия – амплитудный спектр микросейсмических шумов.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве основы для дальнейшего применения развиваемого подхода в практически значимых оценках спектральных параметров очагов землетрясений восточной зоны Северного Кавказа для различного уровня магнитуд.

ВЫВОДЫ

Изучение особенностей глубинной структуры, физических характеристик, геодинамической активности тектоносферы неразрывно связано с понятием сейсмической добротности, определяющей волновые свойства разномасштабных объемов разломно-блоковой геологической среды, определяющие условия распространения, затухания и рассеяния сейсмических колебаний. Благодаря техническому

и организационному совершенствованию сети сейсмологических наблюдений ФИЦ ЕГС РАН на Северном Кавказе стало возможным проводить оценку частотно-зависимой добротности земной коры в региональном масштабе.

Впервые на территории восточной части Северного Кавказа, включающей в себя Терско-Каспийский прогиб, Дагестанский клин и прилегающие структуры БК, с использованием модели одиночного рассеяния, по методу огибающей кода-волн определено среднее региональное частотно-зависимое соотношение для оценки сейсмической добротности для различных значений геометрического расхождения β : $Q_c = 76 \pm 15 \cdot f^{0.89 \pm 0.09}$ при $\beta = 0.5$ и $Q_c = 97 \pm 21 \cdot f^{0.88 \pm 0.11}$ при $\beta = 1.0$.

Усовершенствована методика расчета и определены основные параметры (время начала окна коды, длина временного окна коды), позволяющие

Таблица 3. Спектральные параметры очагов землетрясений Восточного Кавказа

Дата	Источник	Время в очаге (UTC)	Координаты эпицентра, град		h , км	M_w/n^*	K_p	$\lg M_0$, $H \cdot M \cdot 10^{16}$	f_c^{**} , Гц
			широта	долгота					
11.10.2008	Авторы	09:06:11	43.35	46.27	16	5.8/1	14.5	63.0	0.7–1.0
	ГСМТ	09:06:15	43.40	46.19	13	5.8		65.6	
26.03.2013	Авторы	23:35:21	43.26	41.73	6	4.8/5	11.7	1.5	0.8–3.5
	ГСМТ	23:35:24	43.25	41.57	18	4.9		2.7	
28.05.2013	Авторы	00:09:51	43.19	41.70	6	5.1/4	11.6	6.3	1.5–2.4
	ГСМТ	00:09:53	43.28	41.65	12	5.2		7.6	
29.09.2014	Авторы	01:38:08	41.02	48.33	3	5.1/3	12.3	6.3	0.8–1.0
	ГСМТ	01:38:09	41.42	47.76	33	5.1		5.7	
03.05.2017	Авторы	08:53:41	41.61	46.72	32	5.0/10	12.1	3.1	1.1–2.8
	ГСМТ	08:53:45	42.06	46.77	58	5.1		5.1	
12.12.2020	Авторы	21:29:48	43.03	45.54	20	4.8/10	12.5	1.5	1.0–2.8
	ГСМТ	21:29:50	43.16	45.40	13	4.8		2.3	
20.10.2021	Авторы	04:45:40	43.02	45.02	13	4.7/6	12.1	1.2	0.9–2.6
	ГСМТ	04:45:41	43.22	45.59	17	4.7		1.7	

Примечания: n^* – количество сейсмических станций, участвующих в расчете моментной магнитуды M_w ; ** – диапазон значений угловой частоты f_c для всех сейсмических станций, использованных в расчете спектральных параметров; K_p – энергетический класс по работе [Раутиан и др., 1981].

получать достоверные оценки спектральных параметров очагов местных землетрясений с использованием модуля “Coda Q” программного комплекса SEISAN [Havskov et al., 2020]. Внедрение программного комплекса в практику обработки цифровых сейсмограмм позволило получить интегральные оценки частотно-зависимой добротности в целом для региона, где установлено достаточное число сейсмостанций [Zvereva et al., 2023].

Оценивая значения добротности по кода-волнам в окне с изменяемой шириной, можно составить общее представление о глубинном строении “охваченного их распространением” объема слоистой геофизической среды.

Представляется целесообразным использование средних значений частотно-зависимой добротности $Q_c(f)$ для внесения поправки за затухание в наблюдаемый спектр S -волн при расчете спектральных параметров очагов восточной зоны Северного Кавказа.

Результаты исследования призваны содействовать повышению информативности каталогов землетрясений, в частности – их наполнению данными об энергетических характеристиках сейсмических событий (универсальными

значениями моментных магнитуд, M_w) в наиболее сейсмоактивных регионах нашей страны, выявлению причин и механизмов развития опасных процессов эндогенной природы, их территориального распространения и повторяемости.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам ЦО ФИЦ ЕГС РАН Е.А. Бабковой, Л.Н. Королецки, П.А. Борисову и сотрудникам СОФ ФИЦ ЕГС, участвующим в процессе подготовки данных, используемых в настоящей работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-01271-23 ФИЦ ЕГС РАН и государственного задания № 075-00693-22-00 ИФЗ РАН, а так же с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абубакиров И.Р.* Оценка характеристик затухания поперечных волн в литосфере Камчатки по наблюдениям цифровой широкополосной станции “Петропавловск” // *Физика Земли*. Т. 10. 2005. С. 46–58.
- Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Гусева Е.М., Павлов В.М., Скоркина А.А.* Массовое определение моментных магнитуд M_w и установление связи между M_w и ML для умеренных и слабых камчатских землетрясений // *Физика Земли*. 2018. № 1. С. 37–51. DOI: 10.7868/S0002333718010039
- Антикаева О.И.* Поле поглощения поперечных волн в окрестностях очага Дагестанского 1970 г. землетрясения по короткопериодной коде. Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2020. № 2 (81). С. 48–56.
- Габсатарова И.П., Мехрюшев Д.Ю., Королецьки Л.Н., Адилев А.З., Магомедов Х.Д., Саяпина А.А., Багаева С.С., Янков А.Ю., Иванова Л.Е.* Северный Кавказ. Землетрясения России в 2020 году. Ежегодник. Обнинск. 2022. С. 17–24.
- Гусев А.А., Гусева Е.М.* Оценка затухания поперечных волн в среде вблизи ст. “Петропавловск”, Камчатка, по спаду спектра // *Физика Земли*. № 4. 2016. С. 35–51.
- Добрынина А.А., Саньков В.А., Чечельницкий В.В.* Новые данные о затухании сейсмических волн в литосфере и верхней мантии северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы // *Докл. РАН*. 2016. Т. 468. № 1. С. 88–92.
- Добрынина А.А., Предеин П.А., Саньков В.А., Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.Д., Горбунова Е.А.* Пространственные вариации затухания сейсмических волн в Южнобайкальской впадине и прилегающих областях (Байкальский рифт) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2019. Т. 10. № 1. С. 147–166.
- Зверева А. С., Собисевич А. Л., Лиходеев Д.В.* к вопросу о взаимосвязи моментных и локальных магнитуд землетрясений Северо-Западного Кавказа // *Докл. РАН. Сер. Науки о Земле*. 2023. Т. 508. № 1. С. 98–107.
- Кирсанов В.И., Павленко О.В.* Оценки добротности коры и верхней мантии Северо-Восточного Кавказа по записям сейсмостанции “Махачкала” // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2019. Т. 46. № 2. С. 60–73. DOI: 10.21455/VIS2019.2-6
- Копничев Ю.Ф.* Модель формирования хвостовой части сейсмограммы // *Докл. АН СССР*. 1975. Т. 222. № 2. С. 333–335.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.* Неоднородности поля поглощения S -волн в литосфере Кавказа и их связь с сейсмичностью // *Геофизические процессы и биосфера*. 2019. Т. 18. № 3. С. 67–76. <https://doi.org/10.21455/GRB2019.3-4>
- Краснопевцева Г.В.* Глубинное строение Кавказского сейсмоактивного региона. М.: Наука. 1984. 109 с.
- Кромский С.Д., Павленко О.В., Габсатарова И.П.* Проявления особенностей излучения и распространения сейсмических волн на Северном Кавказе в кода-волнах региональных землетрясений // *Физика Земли*. 2018. № 2. С. 33–44.
- Лукк А.А., Шевченко В.И.* Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа // *Физика Земли*. 2019. № 4. С. 99–123. <https://doi.org/10.31857/S000233372019499123>
- Лутиков А.И., Габсатарова И.П. и Донцова Г.Ю.* Об устойчивости параметров сейсмического режима во времени на примере востока центральной части Северного Кавказа // *Российский сейсмологический журнал*. 2021. Т. 3. № 3. С. 61–74. DOI: 10.35540/2686-7907.2021.3.04
- Магомедов Р.А. Мамаев С.А.* Неотектоника и современная сейсмичность Восточного Кавказа. Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. XII. 2022. С. 284–308.
- Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Дягилев Р.А., Мехрюшев Д.Ю., Зверева А.С.* Оценка регистрационных возможностей сейсмической сети в западной части Северного Кавказа через геометрию сети и локальный уровень микросейсмических шумов // *Сейсмические приборы*. 2020. Т. 56. № 3. С. 35–60. doi: 10.21455/si2020.3-3
- Малянова Л.С., Зверева А.С., Габсатарова И.П.* Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа // *Землетрясения Северной Евразии*. 2022. Вып. 25 (2016–2017 гг.). С. 253–260. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.23
- Несмеянов С.А.* Шовные зоны как верхнекоровые сейсмогенерирующие структуры // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2012. № 1. С. 3–26.
- Павленко В.А., Павленко О.В.* Поглощение сейсмических волн в коре и верхней мантии в окрестностях сейсмостанции “Кисловодск” // *Физика Земли*. Т. 4. 2016. С. 24–34.
- Павленко О.В.* Характеристики поглощения сейсмических волн в коре и верхней мантии Северного Кавказа // *Физика Земли*. 2008. № 6. С. 52–60.
- Павленко О.В.* Изучение закономерностей излучения и распространения сейсмических волн в коре и верхней мантии Северного Кавказа по записям сейсмостанций “Сочи” и “Анапа” Обнинск: ГС РАН. 2010. С. 138–142.
- Павленко О.В.* Оценка добротности коры и верхней мантии в окрестностях Сочи и Анапы (Северный Кавказ) // *Физика Земли*. 2016. № 3. С. 19–30.
- Павленко О.В.* Характеристики поглощения сейсмических волн в восточной части северного кавказа, оцененные по записям сейсмостанции “Махачкала” // *Физика Земли*. 2020. № 5. С. 36–45.
- Путовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А.* Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наукова думка. 1990. 252 с.
- Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С., Земцова А.Г., Проскурин А.П., Путовитенко Б.Г., Путовитенко А.Н., Синельникова Л.Г., Филина А.Г.1, Шенгелия И.С.* Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука. 1981. 143 с.

- Ризниченко Ю. В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9–27.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатилов А.В.* Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН 2014. 256 с.
- Собисевич Л.Е., Потемка Э.П., Собисевич А.Л., Канониди Х.Д., Канониди К.Х., Преснов Д.А., Суворова И.И.* Сейсмичность Крымско-Кавказского региона (по результатам инструментальных наблюдений гидродинамических и сейсмических процессов) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2015. № 2 (186). С. 93–100.
- Сычева Н.А., Сычев И.В.* Исследование добротности среды Северного Тянь-Шаня (Бишкекского геодинамического полигона) на основе кода-волн локальных землетрясений // Геосистемы переходных зон. 2017. Т. 1. № 3. С. 21–39.
- Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А.* Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. М.: ГЕОС. 2002. 225 с.
- Трифонов В. Г., Соколов С.Ю., Соколов С. А., Хессами Х.* Мезозойско-кайнозойская структура Черноморско-Кавказско-Каспийского региона и ее соотношение со строением верхней мантии // Геотектоника. № 3. 2020. С. 55–81.
- Хаин В.Е.* Кавказ. Тектоническая карта. – М: 1:5 500 000. Большая Советская Энциклопедия. 1973. Т. 11. С. 112–114.
- Харазова Ю.В., Павленко О.В., Дудинский К.А.* Связь характеристик распространения сейсмических волн на Западном Кавказе с геолого-тектоническими особенностями региона // Физика Земли. 2016. № 3. С. 68–81.
- Aki K.* Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1980. V. 85. № B11. P. 6496–6504.
- Aki K., Chouet B.* Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects // J. Geophys Res. 1975. V. 80 (23). P. 3322–3342. DOI: 10.1029/JB080i023p03322
- Baskoutas I.* Dependence of coda attenuation on frequency and lapse Time // PAGEOPH. 1996. V. 147. № 3.
- Bora N., Biswas R.* Quantifying regional body wave attenuation in a seismic Prone zone of Northeast India // Pure and Applied Geophysics. 2017. V. 174. P. 1953–1963. DOI: 10.1007/s00024-017-1515-0
- Brune J. N.* Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of geophysical research. 1970. V. 75 (26). P. 4997–5009. DOI: 10.1029/JB075i026p04997
- Dasović I., Herak M., Herak D.* Coda-Q and its lapse time dependence analysis in the interaction zone of the Dinarides, the Alps and the Pannonian Basin. Phys // Chem. Earth. 2013. V. 63. P. 47–54. DOI: 10.1016/j.pce.2013.03.001
- 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. № B4. P. 2825–2852.
- Ershov A.V., Brunet M.F., Nikishin A.M., Bolotov S.N., Nazarevich B.P., Korotaev M.V.* Northern Caucasus basin: thermal history and synthesis of subsidence models // Sedimentary Geology. 2003. V. 156 (1–4). P. 95–118. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(02\)00284-1](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(02)00284-1)
- Fehler M., Hoshihara 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 // Geophys. J. Inf. 1992. V. 108. P. 787–800.
- Giampiccolo E., Tiziana T.* Regionalization and dependence of coda Q on frequency and lapse time in the seismically active Peloritani region (northeastern Sicily, Italy) // J Seismol. 2018. V. 22. P. 1059–1074. DOI: 10.1007/s10950-018-9750-0
- Gök R., Kaviani A., Matzel E.M., Pasyanos M.E., Mayeda K., Yetirmishli G., El-Hussain I., Al-Amri A., Al-Jeri F., Godoladze T., Kalafat D., Sandvol E.A., Walter W. R.* Moment Magnitudes of Local/Regional Events from 1D Coda Calibrations in the Broader Middle East Region // Bulletin of the Seismological Society of America. 2016. V. 106 (5). P. 1926–1938. <https://doi.org/10.1785/0120160045>
- Gupta S.C., Teotia S.S., Rai S.S., Gautam N.* Coda Q estimates in the Koyna region, India // Pure Appl Geophys. 1998. V. 153. P. 713–731. DOI: 10.1007/s000240050216
- Havskov J., Malone S., McCloug D., Crosson R.* (1989) Coda Q for the state of Washington // Bull Seismol SocAm. 1989. V. 79. P. 1024–1038. DOI: 10.1785/BSSA0790041024
- Havskov J., Ottemöller L.* Routine processing in earthquake seismology. Springer. 2010. 347 p.
- Havskov J., Sørensen M.B., Vales D., Özyazıcıoğlu M., Sánchez G., Li B.* Coda Q in different tectonic areas, influence of processing parameters // Bulletin of the Seismological Society of America. 2016. V. 106(3). P. 956–970. DOI: 10.1785/0120150359
- Havskov J., Voss P.H., Ottemöller L.* Seismological observatory software: 30 Yr of SEISAN // Seismological Research Letters. 2020. V. 91(3). P. 1846–1852. DOI: 10.1785/0220190313
- Ibanez J.M., Del Pezzo E., De Miguel F., Herraiz M., Alguacil G., Morales J.* Depth-dependent seismic attenuation in the Granada zone (southern Spain) // Bull Seism Soc Am. 1990. V. 80. P. 1232–1244. DOI: 10.1785/BSSA0800051232
- Ismail-Zadeh A., Adamia Sh., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., Gorshkov A., Gvishiani A., Ismail-Zadeh T., Mikhail K., Kaban M.K., Kadirov F., Karapetyan J., Kangarli T., Kiria J., Koulakov I., Mosar J., Mumladze T., Muller B., Sadradze N., Safarov R., Schilling F., Soloviev A.* Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus // Earth-Science Reviews. 2020. V. 207. P. 103222. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103222>
- Kaban M.K., Petrunin A.G., El Khrepy S., Al-Arifi N.* Diverse Continental Subduction Scenarios Along the Arabia-Eurasia Collision Zone // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. № 14. P. 6898–6906. DOI: <http://doi.org/10.1029/2018GL078074>
- Kanamori H.* The energy release in great earthquakes // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. № 20. P. 2981–2987.

- Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V.* Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography // *Solid Earth*. 2012. V. 3. P. 327–337. <https://doi.org/10.5194/se-3-327-2012>
- Mayeda K., Koyanagi S., Aki K.* Site amplification from S-wave coda in the Long Valley Caldera region, California // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1991. V. 81. № 6. P. 2194–2213.
- Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblou G.M.* Velocities of contemporary movements of the Northern Caucasus estimated from GPS observations // *Geotectonics*. 2015. V. 49(3). P. 210–218. <https://doi.org/10.1134/S0016852115030036>
- Pezzo D.E., Ibanez J.M.* Seismic Coda-Waves Imaging Based on Sensitivity Kernels Calculated Using an Heuristic Approach // *Geosciences*. 2020. V. 10. P. 304. <http://dx.doi.org/10.3390/geosciences10080304>
- Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A.* The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision // *Tectonophysics*. 1989. V. 161 (1–2). P. 1–21. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90297-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90297-7)
- Puller J.J.* Attenuation of coda waves in New England // *Bulletin of the seismological society of America*. 1984. V. 74 (4). P. 1149–1166. DOI: 10.1785/BSSA0740041149
- Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Khara-zova Yu.V., Sysolin A.I., Andreeva N.V., Pogrebchenko V.V., Chervinchuk S.Yu., Chen Jie Liu Jiao, Ovsyuchenko A.N., Lar'kov A.S.* Deep Structure of the Northwestern Termination of the Caucasus from New Geological and Geophysical Data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020. V. 56. № 6. P. 772–788. <https://doi.org/10.1134/S1069351320060075>
- Sato H., Fehler M.C., Maeda T.* Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth. Springer Science & Business Media. 2012.
- Shapiro N.M., Campillo M., Margerin L., Singh S.K., and oth.* The energy partitioning and the diffusive character of the seismic coda // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2020. V. 90. № 3.
- The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT). Global CMT Catalog Search [Site]. <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (дата обращения 30.10.2022).
- Xie J., Nuttli O.* Interpretation of high-frequency coda at large distance: stochastic modeling and method of inversion // *Geophys. J.* 1988. V. 95. P. 579–595.
- Zvereva A.S., Havskov J., Gabsatarova I.P.* Regional variation of coda Q in Northwest Caucasus // *J Seismol.* 2023. V. 27. P. 363–384. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-023-10154-8>

Coda Q in the Geophysical Medium of the Northeast Caucasus

A. S. Zvereva^{a, *}, A. L. Sobissevich^b, and I. P. Gabsatarova^c

^a*Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Perm, 614007 Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^c*Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Obninsk, 249035 Russia*

*e-mail: zvereva.as59@gmail.com

Received April 20, 2023

revised June 21, 2023

accepted June 22, 2023

Abstract – For the eastern zone of the North Caucasus, including the Tersko-Caspian trough, the Dagestan wedge and adjacent structures, with the maximum coverage of the data from the Federal network of seismological observations of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), the regional frequency-dependent relations for estimating the seismic Q -factor of the Earth's crust and upper mantle are determined by the coda-wave envelope method. In total, waveforms of 394 crustal earthquakes with source depths from 1 to 42 km and magnitudes from 2.2 to 5.5 are analyzed using the Coda Q module of the SEISAN software package (Havskov et al., 2020). The seismic-Q estimation technique using the single-scattering model is described in detail. Recommendations are given how to practically use the obtained estimates characterizing the wave properties of different-scale volumes of the fault-block geological environment to make attenuation corrections when calculating the source spectral parameters in the eastern zone of the North Caucasus. The results of the study will help to improve the information content of earthquake catalogs, in particular, to fill them with data on the energy characteristics of seismic events (universal values of moment magnitudes, M_w) in the most seismically active regions of the Russian Federation.

Keywords: Coda Q, coda waves; sources spectral parameters of large earthquakes, scalar seismic moment, moment magnitude