

УДК 550.34.097

ИЗУЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В КОРЕ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ВОСТОЧНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ

© ¹Пономарёва Н.Л., ²Габсатарова И.П., ²Бабкина В.П., ²Малянова Л.С.

¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Махачкала

²ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск

Представлены результаты изучения поглощения S-волн в коре и верхней мантии на территории Восточного Предкавказья по записям станции «Махачкала» за 2005–2016 гг. Для расчета оценок частотно-зависимой добротности среды $Q(f)$ применен метод исследования сейсмической коды. Использовались записи временных интервалов различной длины от 20 до 90 с, отсчитываемых от отметки времени, равного двум временам пробега S-волн. Получены средние оценки добротности в районе сейсмической станции «Махачкала» в частотной полосе 0.5–6 Гц: на расстояниях от 0 до 100 км – $Q(f) \approx 50 f^{0.96}$, на расстояниях от 100 до 200 км – $Q(f) \approx 79 f^{1.09}$.

Ключевые слова: добротность среды, поглощение энергии сейсмических волн, скалярный сейсмический момент, спектры, кода-волны

Введение

Исследования по поглощению энергии сейсмических волн на пути от источника до станции, учет которого необходим для адекватной оценки таких параметров, как скалярный сейсмический момент M_0 , напрямую связаны с изучением добротности $Q(f)$ – одной из наиболее информативных характеристик среды, дающей представление о материале и физических условиях внутренних слоев Земли, которую можно определить по записям локальных землетрясений.

Для оценки добротности Q использовались методы, разработанные К. Аки, Т.Г. Раутиан и др. [7, 5], в основе которых лежит принцип подавления эффектов источника излучения и локальных эффектов в спектрах поперечных волн с помощью кода-волн, измеренных на фиксированном времени с момента первого вступления.

Такие исследования на основе изучения огибающих кода-волн успешно проводятся на Байкале [7], Северном Тянь-Шане [6], Урале [2] и др. Опыт, полученный коллегами в других регионах, был использован нами для региона Северный Кавказ.

Ранее (1978–1979 гг.) в работах Ю.Ф. Копничева, Т.Г. Раутиан и др. [5] впервые построены огибающие кода-волн для разных районов (в том числе, для Кавказа) и получены первые оценки добротности среды. Оценки добротности среды на Кавказе получены по записям 42 землетрясений с магнитудами 3.0–5.7 короткопериодными приборами СКМ-3, т.е. оценки добротности относятся к сравнительно узкой полосе частот (~0.5–1.25 Гц). Геометрическое расхождение описывалось функциями, зависящими от расстояния как $\sim 1/r^a$, и показатель степени a предполагался равным 0.5,

0,75 и 1.0. Для приповерхностных (до глубин ~3 км) и для более глубоких слоев получено $Q \approx 70-80$, $120-170$ и $250-330$ (в предположении $a \approx 0.5-1.0$).

О.В. Павленко были проведены более детальные оценки добротности среды в окрестностях сейсмостанций «Сочи» (SOC), «Анапа» (ANN) и «Кисловодск» [6]. Получены оценки добротности в районе Сочи $Q(f) \approx 55f^{0.9}$, в районе Анапы $Q(f) \approx 90f^{0.7}$, Кисловодска $Q(f) \approx 85f^{0.9}$ на частотах 1–6 и 1–20 Гц соответственно.

В этих работах для оценки добротности использован метод «нормализации по коде», также оценены и другие параметры, необходимые для расчета акселерограмм сценарных землетрясений в окрестностях городов Сочи, Анапа и Кисловодск. Найдены заметные различия характеристик затухания на низких частотах в этих двух районах, что свидетельствует о различиях геологического строения приповерхностной части среды в окрестностях этих станций. В то же время на частотах выше ~6 Гц оценки добротности, полученные по записям сейсмостанций «Сочи» и «Анапа», оказались близки. На этих частотах оценки добротности относятся к более глубоким частям земной коры, которые очевидно сходны в геологическом и тектоническом плане в районах Сочи, Анапы и Кисловодска.

Метод и данные

Для исследования в Восточном Предкавказье была выбрана сейсмическая станция «Махачкала», расположенная в сейсмоактивной зоне Терско-Каспийского передового прогиба, в зоне сочленения его со структурами Дагестанского клина, в прибрежной части Каспийского моря (рис. 1).

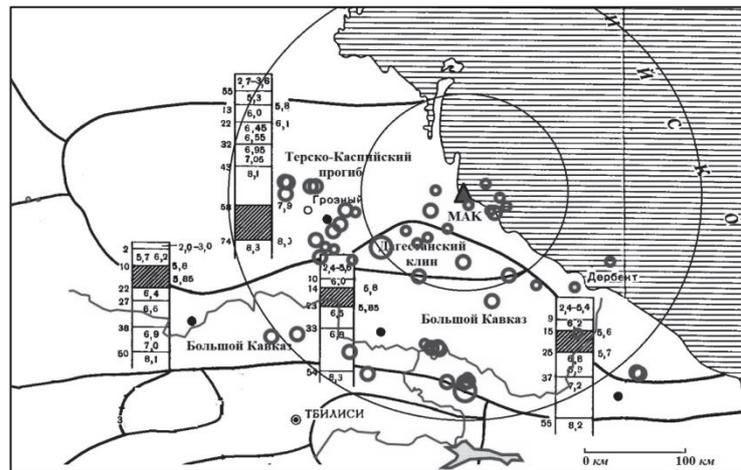


Рис. 1. Фрагмент схемы районирования Кавказа по типу скоростной модели земной коры [7] и положение эпицентров землетрясений, взятых для анализа записей сейсмической станции «Махачкала». Кругами показаны зоны радиусом 100 и 200 км от станции

До декабря 2017 года, регистрация землетрясений на станции «Махачкала» осуществлялась широкополосным сейсмометром СМ-3ОС, частотный диапазон – 0.02–7 Гц, и короткопериодным сейсмометром СМ-3КВ, частотный диапазон – 0.5–16 Гц, с использованием 16-разрядного АЦП станции SDAS v2.4 включающей; блок сбора и выделения сейсмического сигнала, систему точного времени, компьютер для архивации и комплект программ обработки WSG. Из-за современного расположения станции в черте города, записи ее характеризуются высоким уровнем шума, особенно на высоких частотах. В связи с этим для анализа использовались только довольно сильные землетрясения с $K_p \geq 10$ за 2005–2016 гг. (рис. 1), что в большинстве случаев позволяло иметь записи без «зашкала» только на каналах пониженной чувствительности. Землетрясения были удалены от станции «Махачкала» на расстояния в интервале 5–200 км.

В основу реализованного с помощью программы SAC2000 и ее функций метода оценки добротности по кода-волнам был положен алгоритм расчета добротности [1, 6], который включал следующие этапы:

– чтение цифровых сейсмограмм в формате css 3.0; устранение линейного тренда (rtrend); фильтрация ряда по выбранной частоте (как правило, набор октавных полосовых фильтров); выделение фрагментов записи анализируемого участка сейсмической коды длиной t_c (20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 и 90 с), расчет отношения сигнал/шум на фильтрованных записях;

– построение огибающей коды на основе преобразования Гильберта (envelope), логарифмирование ее амплитуд, сглаживание, построение регрессии, определение углового коэффициента наклона огибающей и коэффициента корреляции R (linefit);

– пересчет углового коэффициента k в добротность по формуле: $k = -\pi f/Q(f)$ для выделенных участков при условиях: коэффициент корреляции, полученный при построении регрессии, должен быть $R \geq 0.5$, а отношение сигнал/шум ≥ 3 (в противном случае данные не участвуют в вычислении среднего значения добротности).

Составленные процедуры прошли испытание на тех же самых записях сейсмической станции «Кисловодск», примененных в [4] для расчета добротности методом «нормализованной коды» с использованием авторского программного обеспечения. Огибающие коды строились нами на предварительно отфильтрованных записях в частотных полосах: 1–2; 2–3.5; 3.5–5.5; 5.5–8.0; 8.0–11.0; 11.0–14.5; 14.5–18.5; 18.0–23.0; 23.0–28.0; 28.0–33.5; 33.5–39.5 Гц по аналогии с [6]. Отличие состояло в выборе анализируемого окна записи коды – в методе О.В. Павленко это 40-секундное окно от времени вступления S -волны, по применяемой нами методике делался перебор длины окна от отметки двойного значения пробега S -волны (от 20 до 90 с) и, кроме того, вычислялось среднее значение $Q(f)$.

Полученные нами оценки добротности $Q(f)$ в окрестностях станции «Кисловодск» для 20- и 30-секундных окон хорошо согласовывались с данными О.В. Павленко [4]. Это вселило уверенность для продолжения дальнейших работ и возможности применения построенной процедуры для расчета добротности под станцией «Махачкала».

Результаты и обсуждение

На рис. 2 (а и б) приводятся примеры записей коды-волн в разных частотных полосах и огибающей коды для окон длительностью 70, 80 и 90 с для землетрясения 13 мая 2016 г. в 21^h15^m. В табл. 1 приводятся расчетные значения добротности $Q(f)$, полученные в окнах различной длительности (интервалов записей коды-волн) для событий в окрестности станции «Махачкала».

Таблица 1

Значения добротности $Q(f)$ для различных временных окон W и различных расстояний от станции «Махачкала»

Δ , км	Добротность, $Q(f)$							
	$W=20$ с	$W=30$ с	$W=40$ с	$W=50$ с	$W=60$ с	$W=70$ с	$W=80$ с	$W=90$ с
0–100	$42 \cdot f^{1.10}$	$53 \cdot f^{1.14}$	$63 \cdot f^{1.11}$	$75 \cdot f^{1.10}$	$89 \cdot f^{1.02}$	$95 \cdot f^{1.03}$	$109 \cdot f^{1.00}$	$116 \cdot f^{1.01}$
101–200	$50 \cdot f^{1.02}$	$71 \cdot f^{1.12}$	$86 \cdot f^{1.06}$	$108 \cdot f^{0.96}$	$117 \cdot f^{0.93}$	$129 \cdot f^{1.09}$	$137 \cdot f^{0.99}$	$144 \cdot f^{1.01}$

Примечание: W – временное окно с записью коды-волны

Увеличение длительности окна позволяет оценить поглощающие свойства более глубоких слоев земной коры. Получены средние оценки добротности в районе сейсмической станции «Махачкала» в частотной полосе 0.5–6 Гц: на расстояниях от 0 до 100 км – $Q(f) = 50 \cdot f^{0.96}$, на расстояниях от 100 до 200 км – $Q(f) = 79 \cdot f^{1.09}$.

Практическое применение полученных значений добротности S -волн

Сейсмический момент и другие динамические параметры очага определяются из

спектров записей сейсмических волн с использованием дислокационной модели Бруна, нашедшей широкое применение в сейсмологической практике. Следуя методике Бруна, спектр объемной волны аппроксимируется в билогарифмическом масштабе двумя прямыми: в длиннопериодной части спектра прямой параллельной оси частот, в области коротких периодов – наклонной прямой (рис. 3).

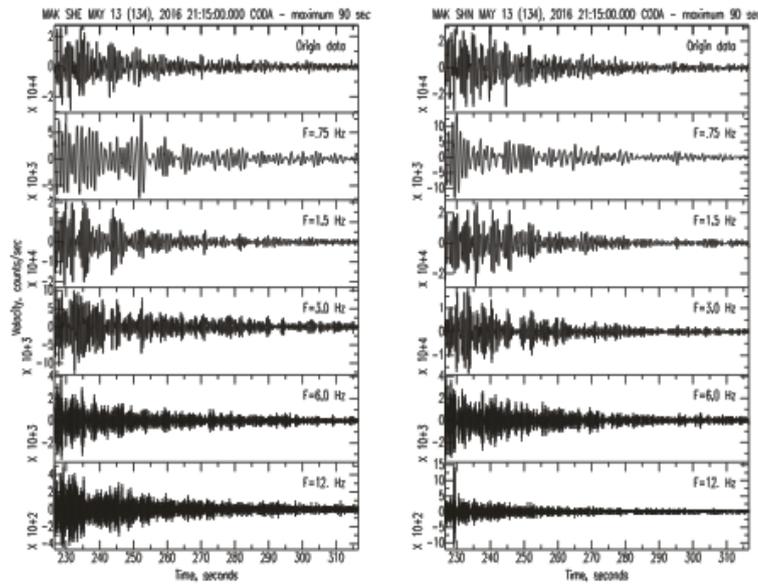


Рис. 2. Записи сейсмической коды в разных частотных полосах для землетрясения 13 мая 2016 г. в 21^h15^m (а) и огибающие коды для временных окон в 70, 80 и 90 с на двух горизонтальных компонентах (б)

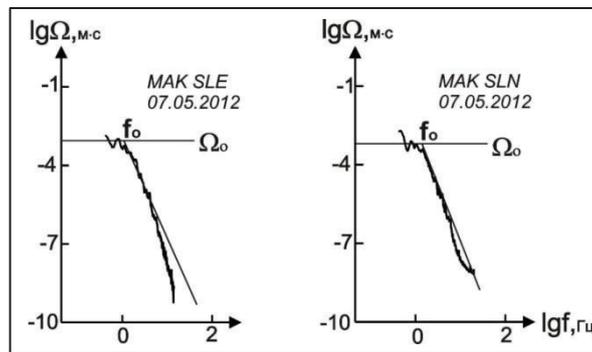
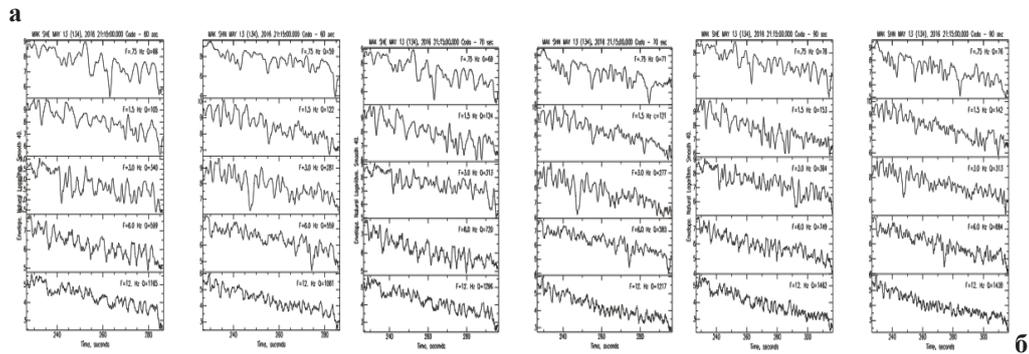


Рис. 3. Спектры S-волны землетрясения 7 мая 2012 г. для горизонтальных компонент на сейсмической станции «Махачкала»

Спектр записи реального землетрясения на станции является суперпозицией эффектов самого источника, характеристики сейсмометра, среды на пути очаг–станция, направленности излучения.

Для приведения стационарных спектров к очаговым вводится поправка $S(f)$ за неупругое затухание волны в мантии, которая рассчитывается по формуле:

$$S_m(f) = \exp(-\pi f t_s^*), \quad (1)$$

где t_s^* – отношение времени t_s пробега S -волны до станции регистрации к средней добротности Q_{cp} среды вдоль луча по [8]. Значение Q_{cp} для S -волн определено по записям станции «Махачкала».

Значение сейсмического момента в очаге землетрясения M_0 вычисляется по формуле:

$$M_0 \Delta \Omega_0 (4\pi r \nu^3) / R_{\theta\phi} \cdot G(\Delta, h) \cdot C(\omega), \quad (2)$$

где Ω_0 – максимальное значение спектральной плотности при $\omega \rightarrow 0$; ν и ρ – скорость распространения волны и плотность пород в окрестности очага; $R_{\theta\phi}$ – функция, характеризующая направленность излучения из очага на станцию; $G(\Delta, h)$ – поправка за геометрическое расхождение; $C(\omega)$ – частотная характеристика земной коры под станцией. При исследовании спектров S -волн взято $R_{\theta\phi} = 0.6$. Функция геометрического расхождения $G(\Delta, h)$ оценивалась как $1/r$, где r – гипоцентральное расстояние. Частотная характеристика земной коры под станцией принимается в среднем равной $C(\omega) = 2$ в случае отсутствия данных конкретных исследований.

В табл. 2 приводятся значения скалярного сейсмического момента для землетрясений 07.05.2012 г. и 14.10.2012 г. в сравнении с аналогичными значениями, полученными в GCMТ [9]. Получено хорошее согласование значений M_0 , рассчитанным по разным методикам.

Таблица 2

Значения скалярного момента по спектру S -волны станции «Махачкала» в сравнении с данными GCMТ [7]

Дата, дд.мм.гггг	t_0 , чч:мм:сс.с	Источник	Компонента	Δ , °	M_0 , Н·м	M_w
07.05.2012	04:40:26.9	МАК	BLE	1.73	$7.82 \cdot 10^{17}$	5.9
07.05.2012	04:40:30.1	GCMТ*			$7.78 \cdot 10^{17}$	5.9
14.10.2012	10:13:36.7	МАК	SHN, SHE	1.59	$2.4, 2.3 \cdot 10^{17}$	5.54, 5.55
14.10.2012	10:13:39.6	GCMТ*			$2.80 \cdot 10^{17}$	5.6

Выводы

Разработанная технология получения добротности среды на основе изучения кода-волн и использование записей локальных землетрясений вблизи сейсмической станции «Махачкала» показала хороший первый результат. Исследования будут продолжены для накопления более представительного статистического материала как для станции «Махачкала», так и для других станций Восточного Предкавказья. Это дает возможность исследования неоднородности среды на Северном Кавказе.

Применение полученных значений добротности для построения очаговых спектров позволит расширить информационную базу скалярных сейсмических моментов и спектральной магнитуды Канамори для землетрясений в этом регионе.

Литература

1. Добрынина А.А., Чечельницкий В.В., Саньков В.А. Сейсмическая добротность литосферы юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика, 2011. Т. 52. № 5. С. 712–724.
2. Дягилев Р.А., Скоркина А.А. Определение параметров затухания сейсмических волн для территории Урала // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Седьмой Международной сейсмологической школы. Обнинск. ГС РАН, 2012. С. 126–129
3. Краснопецева Г.В. Глубинное строение Кавказского сейсмоактивного региона. М.: Наука, 1984. 109 с.
4. Павленко В.А., Павленко О.В. Поглощение сейсмических волн в коре и верхней мантии в окрестностях сеймостанции «Кисловодск» // Физика Земли, 2016. № 4. С. 24–34.
5. Раутиан Т.Г., Халтурин М.С., Закиров М.С. Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981. 146 с.
6. Сычева Н.А., Сычев В.Н. Программный комплекс CODAQ для расчета добротности земной коры Северного Тянь-Шаня // Вестник КРСУ, 2015. Т. 15. № 3. С. 144–149.
7. Aki K., Chouet B. Origin of coda-waves: source, attenuation and scattering effects // J. Geophys. Res. 1975. V. 80, N 1. P. 3322–3342.
8. Anderson D.L., Hart R.S. Q of the Earth // J. Geophys. Res. 1978. V. 83, N B12. P. 5869–5882.
9. Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 2825–2852.