

УДК 550.34.09

К ВОПРОСУ О ЗАТУХАНИИ ОБЪЁМНЫХ ВОЛН В ЭЛЬБРУССКОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

Член-корреспондент РАН А. Л. Собисевич¹, А. С. Зверева², Д. В. Лиходеев^{1,*}

Поступило 05.02.2019 г.

Рассмотрены вопросы возникновения и развития опасных эндогенных процессов в южных регионах России. По результатам анализа первичных данных сети сейсмологических наблюдений выполнены оценки добротности слоистой геофизической среды и поглощения энергии упругих волн. Получены новые данные, свидетельствующие в пользу гипотезы о вероятном ареале проявления флюидно-магматических процессов в Эльбрусской вулканической области.

Ключевые слова: сейсмическая добротность, затухание и поглощение сейсмических волн, Эльбрусский вулканический центр, неоднородные структуры земной коры.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524864480-484>

Территория Северного Кавказа, являясь частью протяжённой Крым-Кавказ-Копетдагской зоны Иран-Кавказ-Анатолийского сейсмоактивного региона, характеризуется самой высокой сейсмической опасностью в европейской части России. Известны и активные вулканические центры на Северном Кавказе, крупнейший и наиболее молодой из которых — Эльбрусский, а вся Эльбрусская вулканическая область представляет собой обширную территорию проявлений неоген-четвертичного вулканизма, характеризующуюся достаточно неравномерной плотностью распределения вблизи дневной поверхности вулканических аппаратов, субвулканических структур и интрузий [1, 15]. Геолого-геофизические исследования вулкана Эльбрус свидетельствуют в пользу существования в настоящее время и находящихся в частично расплавленном состоянии элементов магматической питающей системы [2, 3], оказывающих влияние на условия распространения сейсмических волн [4].

В соответствии с картой общего сейсмического районирования Северной Евразии — (ОСР-97) оценка сейсмического потенциала исследуемой территории соответствует в основном 8–9 балльным зонам интенсивности сотрясений (на средних грунтах в баллах шкалы MSK-64). Высокий сейсмический потенциал сопряжён с возможностью развития природно-техногенных катастроф и сопутству-

ющими рисками социально-экономического характера на урбанизированных территориях. В этой связи важными и актуальными представляются вопросы изучения спектральных и динамических параметров очагов землетрясений с целью уточнения особенностей глубинного строения геофизической среды Эльбрусской вулканической области.

Одной из наиболее информативных характеристик среды, дающей представление о физических свойствах глубинных структур, является сейсмическая добротность, $Q(f)$. Оценка этого безразмерного параметра, характеризующего затухание сейсмической энергии при распространении упругих колебаний в геологической среде, возможна посредством анализа сейсмограмм местных землетрясений.

В практике сейсмологических исследований добротность необходима для приведения станционного спектра землетрясения к очаговому, используется при расчете сейсмической энергии, сейсмических моментов и иных очаговых параметров землетрясений, для моделирования возможных сильных движений грунта, построения искусственных сейсмограмм, макросейсмических исследований.

Для исследуемого региона нами были выполнены оценки значений добротности и поглощения с целью уточнения особенностей глубинного строения геофизической среды и выявления потенциальных низкоскоростных неоднородностей земной коры.

Исходными данными для оценки добротности и поглощения являются волновые формы (сейсмограммы) землетрясений, зарегистрированных в 2013–2018 гг. по результатам инструментальных

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской Академии наук, Москва

²Федеральный исследовательский центр им. О.Ю. Шмидта,
Единая геофизическая служба Российской Академии наук,
Обнинск Калужской обл.

*E-mail: dmitry@ifz.ru

наблюдений сети сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН. Таким образом, из каталога землетрясений Северо-Западного Кавказа нами было отобрано 240 событий со значениями соотношения сигнал/шум более трёх; все они — верхнекоровые (глубина очага — менее 40 км) с гипоцентрными расстояниями до 100 км и значениями локальных магнитуд $ML = 1,6-5,5$. Расположение сейсмических станций, для окрестностей которых определялись значения добротности и поглощения, показано на рис. 1.

Для оценки добротности использовались методы, 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 [5, 6]. Расчёты проводились в программном комплексе SAC 2000, а также с использованием алгоритмов CODA Q [7].

Расчёт добротности Q_c выполнен для трёх сейсмических станций: «Гузерибль» (GUZR), «Домбай» (DOM) и «Нейтрино» (NEY). Последняя размещена на базе Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН, расположенной в непосредственной близости от вулканической постройки Эльбруса, в подземных сооружениях Баксанской

нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН.

В табл. 1 представлены средние значения Q_c . Результаты оценки добротности для станции GUZR были получены ранее [8]. Средние значения Q_c были рассчитаны на центральных частотах 1,5; 2,75; 4,5; 6,75; 9,5 и 12,75 Гц для всех временных окон t .

Наблюдаемые вариации значений добротности для трёх сейсмостанций связаны с условиями расположения сейсмических станций и естественно отражают латеральные изменения упругих свойств геологической среды.

Известно [10], что значение добротности, полученное для трассы «источник–приёмник», характеризует некоторый объём среды (эллипсоид), в фокусах которого находятся очаг землетрясения и сейсмическая станция, для которого

$$a = \frac{Vt}{2}, \quad b = \sqrt{\left(\frac{Vt}{2}\right)^2 - \frac{r^2}{4}}, \quad c = h + \sqrt{\left(\frac{Vt}{2}\right)^2 - \frac{r^2}{4}};$$

здесь a и b — длины полуосей эллипсоида, c — глубина нижней границы эллипсоида, V — скорость объёмных волн, r — расстояние источник–приёмник, h — глубина очага землетрясения, $t = t_{\text{start}} + W/2$. t_{start} — время начала окна, W — длина временного окна.

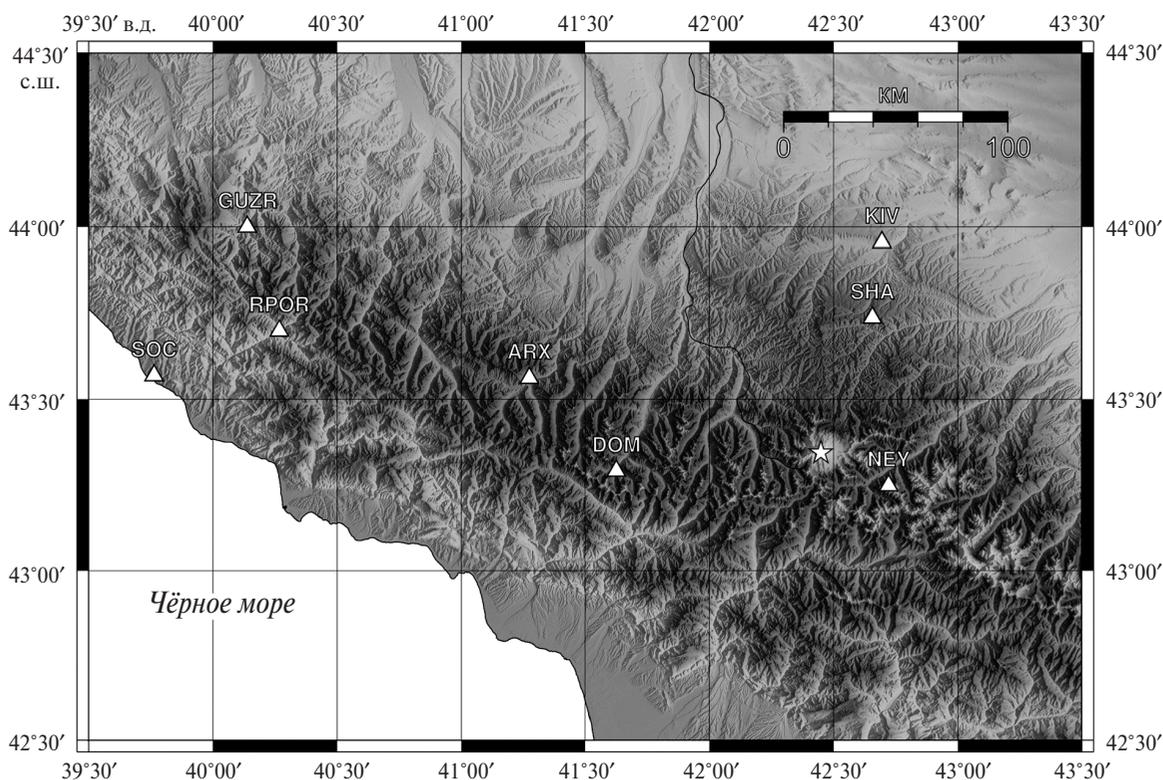


Рис. 1. Карта расположения сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН на Северном Кавказе и в Эльбрусской вулканической области сейсмостанций: GUZR — «Гузерибль», DOM — «Домбай», NEY — «Нейтрино», RPOR — «Красная Поляна», SHA — «Шиджатмаз», ARX — «Архыз», SOC — «Сочи», KIV — «Кисловодск».

Таблица 1. Значения добротности Q_c на частоте 1 Гц, стандартного среднеквадратического отклонения σ и количества событий N , по которым велся расчёт, для трёх сейсмических станций, а также средние значения по трём станциям

t, c	DOM (1,0–11,0 Гц)			NEY (1,0–14,5 Гц)			GUZR (1,0–14,5 Гц)			Среднее (1,0–14,5 Гц)		
	Q_c	σ	N	Q_c	σ	N	Q_c	σ	N	Q_c	σ	N
20	20	7	49	47	15	33	33	12	108	31	17	121
30	29	10	47	61	13	33	49	20	106	45	27	121
40	36	13	44	77	19	31	59	18	99	55	29	121
50	46	21	43	93	25	28	69	24	89	59	26	121
60	56	27	41	105	23	23	80	22	75	68	28	121
70	67	30	38	119	28	22	93	32	70	90	40	121
80	75	36	36	123	21	22	107	50	69	101	44	121
90	83	38	35	133	24	21	125	117	57	115	70	121

Представляется возможным оценить изменения добротности с глубиной, при этом размеры исследуемой области зависят как от длины временного окна t (“окна коды”), так и от эпицентрального расстояния [9, 10]. Увеличение t позволяет оценить поглощающие свойства более глубоких слоёв земной коры и наоборот. Таким образом, для каждого из используемых значений t рассчитаны эмпирические зависимости добротности от частоты $Q(f)$ (табл. 2). По возможности проведено сопоставление полученных результатов с данными других авторов [7, 11, 12].

Отметим, что с увеличением t возрастают и значения $Q(f)$. Так, для окна 70–90 с зависимость $Q(f)$ становится близкой для всех событий, кроме результатов по станции “Домбай”, для которой наблюдаются пониженные значения добротности.

В работе [15] обосновывается развитие Эльбрусской вулканической области как последовательное смещение

составляющих её вулканических центров. Закономерный ход этого процесса экстраполируется авторами цитируемой работы в будущее, и делается вывод о вероятном месте и времени проявления грядущего вулканизма, пространственно наиболее близком к сейсмостанции “Домбай”. Можно предположить, что вулканизм проявит себя в будущем (в ближайший миллион лет) с условным “центром” к западу от современного конуса Эльбруса, над ещё не оконтуренными магматическими структурами в пределах земной коры.

Также для исследуемой области были оценены средние значения коэффициентов затухания сейсмических волн:

$$\delta = \frac{\pi f}{V Q_c},$$

где f — частота, Q_c — добротность на частоте f .

Результаты сведены в таблицу 3.

Таблица 2. Эмпирическая функциональная зависимость добротности Q_c от центральной частоты f для всех временных окон

t, c	DOM	NEY	GUZR	Среднее	МАК [7]	СОС [11]	АНН [11]	КИВ [12]
20	$20 \cdot f^{1,10}$	$47 \cdot f^{1,04}$	$33 \cdot f^{1,00}$	$31 \cdot f^{1,05}$	$42 \cdot f^{1,10}$	—	—	—
30	$29 \cdot f^{1,07}$	$61 \cdot f^{1,02}$	$49 \cdot f^{0,94}$	$45 \cdot f^{1,01}$	$53 \cdot f^{1,14}$	—	—	—
40	$36 \cdot f^{1,07}$	$77 \cdot f^{0,95}$	$59 \cdot f^{0,94}$	$55 \cdot f^{0,99}$	$63 \cdot f^{1,11}$	$55 \cdot f^{0,9}$	$90 \cdot f^{0,7}$	$85 \cdot f^{0,9}$
50	$46 \cdot f^{1,08}$	$93 \cdot f^{0,90}$	$69 \cdot f^{0,93}$	$59 \cdot f^{1,00}$	$75 \cdot f^{1,10}$	—	—	—
60	$56 \cdot f^{1,10}$	$105 \cdot f^{0,87}$	$80 \cdot f^{0,92}$	$68 \cdot f^{0,99}$	$89 \cdot f^{1,02}$	—	—	—
70	$67 \cdot f^{1,10}$	$119 \cdot f^{0,83}$	$93 \cdot f^{0,90}$	$90 \cdot f^{0,92}$	$95 \cdot f^{1,03}$	—	—	—
80	$75 \cdot f^{1,13}$	$123 \cdot f^{0,85}$	$107 \cdot f^{0,89}$	$101 \cdot f^{0,93}$	$109 \cdot f^{1,00}$	—	—	—
90	$83 \cdot f^{1,16}$	$133 \cdot f^{0,84}$	$125 \cdot f^{0,85}$	$114 \cdot f^{0,91}$	$116 \cdot f^{1,01}$	—	—	—

Примечание. Индексы сейсмостанций: GUZR — “Гузерипись”, DOM — “Домбай”, NEY — “Нейтрино”, МАК — “Махачкала”, СОС — “Сочи”, АНН — “Анапа”, КИВ — “Кисловодск”.

Таблица 3. Средние коэффициенты затухания сейсмических волн δ исследуемого региона для различных временных окон t

t	a	b	c	δ	σ
20	51	46	57	0,031557	0,01123
30	59	55	66	0,022941	0,008134
40	68	65	76	0,018493	0,006592
50	77	74	85	0,015406	0,004901
60	86	83	94	0,013063	0,003815
70	95	92	103	0,011325	0,003336
80	103	101	112	0,010079	0,002555
90	112	110	121	0,009096	0,002079

На рис. 2 показана зависимость коэффициента затухания для частоты $f=1,5$ Гц от глубины залегания нижней границы эллипсоида c . Экспоненциальный характер $\delta(C)$ позволяет сделать вывод о различиях в скорости изменения коэффициента затухания, большей у нижней границы коры и уменьшающейся с глубиной.

Методом оценки поглощения независимо от расхождения по наблюдениям за изменением формы спектра записей землетрясений с расстоянием [13, 14] были проанализированы частотные зависимости коэффициента поглощения α . На рис. 3 представлены графики $\alpha(f)$ для продольных и поперечных групп волн, распространяющихся вдоль профилей для нескольких пар сейсмических станций.

Можно предположить, что повышенные значения коэффициента затухания для S -волн на трассе распространения “Домбай–Нейтрино” подтверж-

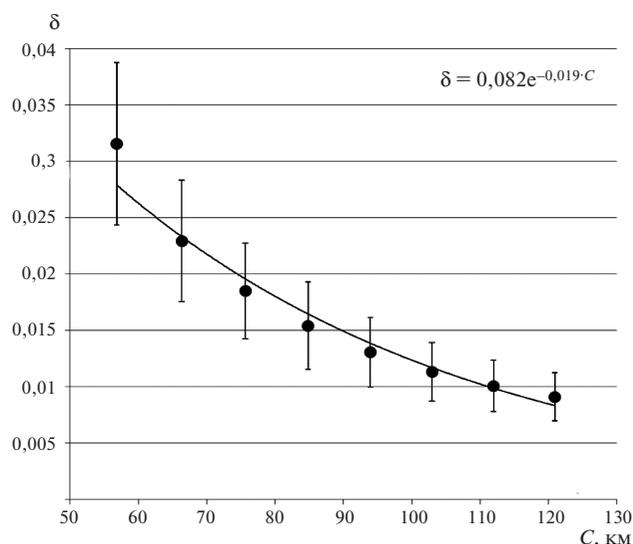


Рис. 2. Зависимость коэффициента затухания δ от глубины залегания нижней границы эллипсоида C .

дают гипотезу о вероятном месте грядущих проявлений флюидно-магматических процессов в Эльбрусской вулканической области.

Таким образом, изучение условий распространения сейсмических колебаний в слоистой геофизической среде и оценка изменений значений добротности и затухания позволяет предположить наличие крупных неоднородных структур на территории, охваченной системой сейсмологических наблюдений. На примере Эльбрусской вулканической области рассчитаны значения добротности среды для трёх региональных сейсмостанций, определены коэффициенты затухания и выполнена количественная оценка поглощения различных типов сейсмических волн по наблюдениям за изменением формы спектра

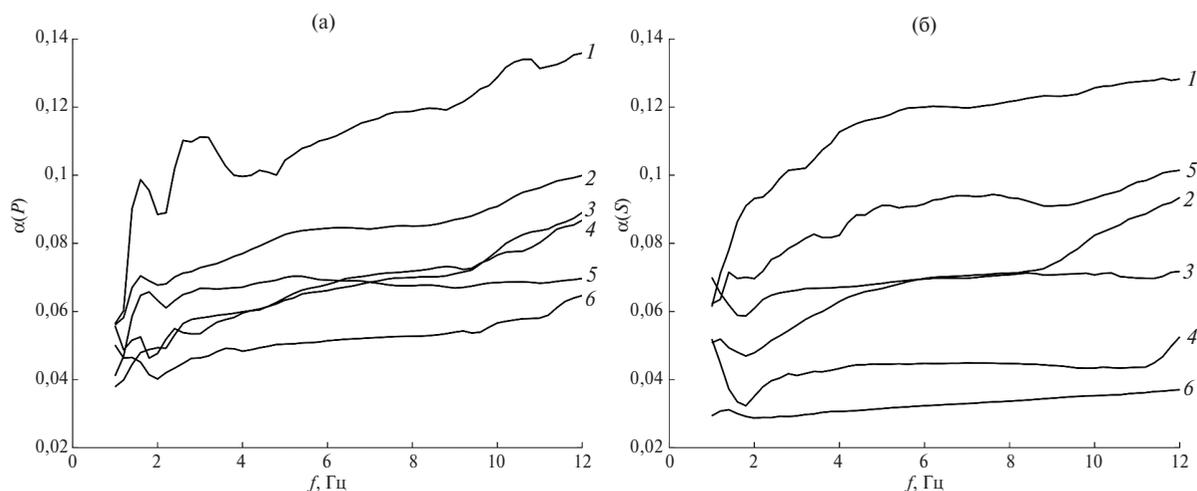


Рис. 3. Зависимость $\alpha(f)$ для различных пар сейсмических станций: 1 — DOM–RPOR; 2 — DOM–SHA; 3 — ARH–SHA; 4 — NEY–SHA; 5 — DOM–NEY; 6 — RPOR–SHA; а — группа P -волн, б — группа S -волн.

записей землетрясений с расстоянием. На основе полученных данных можно сделать вывод в пользу подтверждения гипотезы о вероятном районе проявления опасных эндогенных процессов на исследуемой территории.

Источники финансирования. Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФЗ РАН и гранта Президента Российской Федерации для поддержки научных школ (НШ 5545.2018.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Лиходеев Д.В., Дударов З.И., Жостков Р.А., Преснов Д.А., Долов С.М., Данилов К.Б.* Исследование глубинного строения вулкана Эльбрус методом микросейсмического зондирования // *Вулканология и сейсмология*. 2017. № 6. С. 28–32.
3. *Лиходеев Д.В., Михаленко В.Н.* Температура кровли магматической камеры вулкана Эльбрус // *Геофиз. исслед.* 2012. Т. 13. № 4. С. 70–75.
4. *Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Лиходеев Д.В., Заклюковская А.С., Преснов Д.А.* Развитие системы разномасштабного сейсмического мониторинга в районе вулкана Эльбрус // *Сейсм. приборы*. 2014. Т. 50. № 4. С. 47–57.
5. *Aki K., Chouet B.* Origin of Coda-Waves: Source, Attenuation and Scattering Effects // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. № 1. P. 3322–3342.
6. *Раутиан Т.Г., Халтурин М.С., Закиров М.С.* Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981. 146 с.
7. *Пономарева Н.Л., Габсатарова И.П., Бабкина В.Ф., Малянова Л.С.* Изучение поглощения сейсмических волн в коре и верхней мантии Восточного Предкавказья. В сб.: *Материалы XII Международной сейсмологической школы*. Обнинск, 2017. С. 279–283.
8. *Зверева А.С., Бутырин П.Г.* Оценка зависимости добротности среды от частоты в земной коре территории Западного Кавказа по данным сейсмической станции “Гузерибль”. В сб.: *Материалы XIII Международной сейсмологической школы*. Обнинск, 2018. С. 108–111.
9. *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.
10. *Imtiyaz A. Parvez, Anup K. Sutar and oth.* Coda Q Estimates in the Andaman Islands Using Local Earthquakes // *Pure and Appl. Geoph.* 2008. V. 165. 1861–1878.
11. *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.
12. *Павленко В.А., Павленко О.В.* Поглощение сейсмических волн в коре и верхней мантии в окрестностях сейсмостанции «Кисловодск» // *Физика Земли*. 2016. № 4. С. 24–34.
13. *Халтурин В.И., Урусова Н.В.* Оценка поглощения продольных и поперечных волн в земной коре по наблюдениям над местными землетрясениями // *Тр. Ин-та физики Земли АН СССР*. 1962. № 25 (192).
14. *Федотов С.А., Болдырев С.А.* О зависимости поглощения объемных волн от частоты в коре и верхней мантии Курильской островной дуги // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1969. № 9. С. 17–33.
15. *Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л.* Пульсационно-вихревое развитие Эльбрусской вулканической области (как следствие миграции мантийно-поглощама?) // *ДАН*. 2010. Т. 432. № 1. С. 105–109.

TO THE ESTIMATION OF DAMPING OF SEISMIC BODY WAVES IN THE ELBRUS VOLCANIC AREA

Corresponding Member of the RAS A. L. Sobisevich¹, A. S. Zvereva², D. V. Likhodeev¹

¹*Institute of the Earth Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Kaluzhsky region, Russian Federation*

Received February 05, 2019

The problem of the origin and development of hazardous endogenous processes in the southern regions of Russia is considered. According to the results of the analysis of data obtained by means of the regional seismic network, there were estimated the Q-factor of the layered geophysical medium as well as damping of elastic body waves. The new results testifying in favor of the hypothesis on the likely area of upcoming fluid-magmatic processes in the Elbrus volcanic region are considered.

Keywords: Q-factor, attenuation and absorption of seismic waves, Elbrus volcanic center, crustal inhomogeneities.