

УДК 550.34.097

## Вариации добротности в литосфере Северного Кавказа в широком диапазоне временных интервалов кода–волн

© 2024 г. А.С. Зверева

ФИЦ ЕГС РАН, г. Пермь, Россия

Поступила в редакцию 20.11.2023 г.

**Аннотация.** Рассмотрено соответствие результатов рассчитанных значений добротности методом огибающих кода–волн  $Q_c$  для региона Северного Кавказа и теоретической модели изменения  $Q_c$  в вертикально изменяющейся модели мутности среды, предложенной А.А. Гусевым в 1995 году. Установлено, что в основном наблюдается соответствие между средними значениями  $Q_c$  Северного Кавказа и предсказанной моделью А.А. Гусева. Но есть и различия, которые заключаются в том, что начиная с окна рассматриваемой коды от времени в очаге, равного 60 с,  $Q_c$  перестаёт непрерывно увеличиваться и формирует плато или достигает «насыщения». Данный эффект связан с распространением сейсмических волн в мантии, где в общих потерях энергии вследствие затухания вклад рассеяния минимален за счёт вязкой и однородной структуры мантии, а доминирует внутреннее поглощение, которое имеет постоянное значение. Для более мелких зон, связанных с различным тектоническим строением, эффект «насыщения» также наблюдается, но при других значениях времён начала коды, что может быть связано с распределением неоднородностей в пространстве и их размером.

**Ключевые слова:** добротность, землетрясения, Северный Кавказ, теоретическая модель, время начала окна коды.

**Для цитирования:** Зверева А.С. Вариации добротности в литосфере Северного Кавказа в широком диапазоне временных интервалов кода–волн // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 1. – С. 80–92. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.1.05>. – EDN: N1NHPB

### Введение

В работах [Aki, 1969; Rautian, Khalturin, 1978; Раутиан и др., 1981; Копничев, 1985] впервые были обобщены характеристики коды высокочастотных  $S$ -волн локальных землетрясений. Коды представляют собой окончание сейсмического сигнала локального или регионального события и находятся в «хвосте» сейсмограммы после прихода основных типов волн, таких как  $P$ ,  $S$  и поверхностных волн, зарегистрированных на малых расстояниях от землетрясения. Модели генерации коды–волн основаны на предположении, что коды есть результат рассеяния сейсмических колебаний при их распространении в среде со случайными неоднородностями, т.е. в мутной среде. К. Аки и Б. Шуэ [Aki, Chouet, 1975] впервые предложили модель возникновения коды–волн в результате изотропного однократного рассеяния. В данной модели коды рассматриваются как суперпозиция волн, рассеянных на «точечных» неоднородностях в результате одиночного

рассеяния, при котором пренебрегают потерями энергии на многократное рассеяние.

К. Аки и Б. Шуэ [Aki, Chouet, 1975] связывали разницу между модельной и реальной формой коды–волн с некоторым затуханием, формально выраженным через множитель экспоненциального затухания, содержащий добротность  $Q$ , или добротность по коды–волнам  $Q_c$  [Gusev, 1995]. Позднее Т. Раутиан и В. Халтурин обнаружили, что реальные формы коды в широком диапазоне временных интервалов демонстрируют постепенное увеличение  $Q_c$  с течением времени [Rautian, Khalturin, 1978]. К. Аки [Aki, Richards, 1980] предложил интерпретировать добротность как по коды–волнам  $Q_c$ , так и по  $S$ -волнам  $Q_s$ , главным образом, с точки зрения потерь на рассеяние. А. Дэйнти [Dainty, 1981] предложил аналогичную идею в отношении добротности  $Q_s$  и, предполагая, что внутренняя добротность не зависит от частоты и имеет порядок 1500–2500, пришёл к аналогичному выводу, что на частотах около 1–2 Гц вклад рассеяния в сумме  $Q$  является

доминирующим. По мере появления и развития новых методов предположение, что однократное рассеяние является объяснением затухания кода-волн, устарело, и в настоящее время существует несколько других теорий, которые могут лучше описать их затухание, а многократное рассеяние считается доминирующей формой рассеяния [Gusev, Abubakirov, 1987; Shang, Gao, 1988; Zeng et al., 1991]. Однако метод однократного рассеяния по причине своей простоты и устойчивости получаемого результата широко применяется в современных исследованиях кода-волн [Havskov et al., 2016; Dasovic et al., 2013; Dobrynina et al., 2016; Blanke et al., 2019; Novelo-Casanova et al., 2020; Sivaram, Gupta, 2022]. Мы также прибегли в начале своих исследований к этому методу.

Общая модель рассеяния может быть следующей [Zvereva et al., 2023] – среда имеет внутреннюю добротность  $Q_c$ , вызванную не упругостью среды, которая для земной коры может быть, например, равна постоянному значению 1000 или, что более вероятно, зависит от частоты. Когда лучи проходят от источника к приёмнику, часть энергии уменьшается за счёт рассеяния, поэтому измеренная общая  $Q$  будет включать эффект рассеяния  $Q_{sc}$  (однократного или многократного), однако подразумевается, что внутреннее поглощение  $Q_i$  имеет больший вклад в значение  $Q$  в земной коре, чем рассеяние.

Добротность, определяемая по кода-волнам  $Q_c$ , и частотный параметр  $\alpha$  зависят от заданного значения времени, в котором рассматриваются кода-волны, как это наблюдается во многих исследованиях, таких как, например, [Havskov et al., 1989; Ibanez et al., 1990; Gupta et al., 1998; Calvet, Margerin, 2013; Dasovic et al., 2013; Dobrynina et al., 2011]. Под временем в работе понимается время начала окна коды от времени в очаге при фиксированной длительности окна, и в дальнейшем будем использовать термин «время начала окна коды» или  $LT$  (сокращённо от английского Lapse Time).

М. Фехлер и Х. Сато [Fehler, Sato, 2003] обнаружили, что при частоте 1 Гц добротность  $Q_c$  в основном вызвана рассеянием, а при частоте 10 Гц  $Q_c$  близка к  $Q_i$ . Позже теоретические исследования показали, что при больших значениях времён начала анализа кода-волн  $Q_c$  по существу равно  $Q_i$  [Sato et al., 2012]. На близких расстояниях (0–100 км) Н. Шапиро и др. [Shapiro et al., 2000] обнаружили, что  $Q_{sc}$  в результате рассеяния близко к  $Q_c$ , в то время как на больших расстояниях (большое  $LT$ ) преобладает  $Q_i$ . Д. Сиэ и Б. Митчелл [Xie, Mitchell, 1990] обнаружили, что для  $\lg Q_c$  на коротких расстоя-

ниях преобладает рассеяние  $Q_{sc}$ , тогда как  $Q_i$  преобладает на больших расстояниях. При  $LT$  80 с Ф. Бьянко и др. [Bianco et al., 2002] определили, что  $Q_c$  и  $Q_i$  были близки. Аналогичные результаты были получены в других исследованиях [Carlote et al., 2010; Calvet, Margerin, 2013]. Таким образом, существует общее соглашение, что вклад в добротность  $Q_c$  в основном оказывают рассеяния на малых расстояниях (маленькие значения  $LT$ ) и внутренние поглощения  $Q_i$  на более дальних расстояниях (большие значения  $LT$ ).

В предыдущем исследовании [Zvereva et al., 2023] анализировались вариации добротности в разных временных интервалах кода-волн в литосфере западной части Северного Кавказа. Результаты показали, что наблюдается непрерывное увеличение  $Q_c$  при  $LT=20–60$  с, что хорошо согласуется с теоретической моделью А.А. Гусева [Gusev, 1995], где показаны изменения  $Q_c$  в вертикально изменяющейся модели мутности среды, описанной как степенное уменьшение мутности или коэффициента рассеяния за счёт рассеяния, зависящего от глубины. Однако было обнаружено, что, начиная с  $LT>60$  с,  $Q_c$  перестаёт непрерывно увеличиваться и формирует плато или достигает «насыщения». Исследования [Dasovic et al., 2013; Biswas et al., 2016; Irandoust et al., 2016; Das et al., 2018] в других районах также показали, что значения  $Q_c$  достигают плато с увеличением  $LT$ , хотя и имеют различную степень насыщения в зависимости от регионов и частоты. Таким образом, не все результаты исследований могут быть предсказаны теорией А.А. Гусева.

Представляет интерес расширение региона исследования до всей территории Северного Кавказа в целом. Таким образом, целью настоящей работы является изучение зависимости добротности  $Q_c$  и коэффициента затухания  $\delta$  в широком временном диапазоне кода-волн для всего региона. Для этого поставлены следующие задачи:

- получение оценки добротности и коэффициента затухания для различных значений времени начала окна-коды;
- сопоставление результатов с данными других исследователей;
- оценка различий в целом для региона и для более мелких зон, связанных с особенностями тектонического строения региона.

### Исходные данные и методика расчёта

Оценка добротности  $Q_c$  проводилась методом огибающих кода-волн, основанным К. Аки и Б. Шуэ [Aki, Chouet, 1975]. Данный метод базируется на предположении, что кода-волны

представляют собой волны, однократно рассеянные от случайно, но равномерно распределённых «точечных» неоднородностей в изотропном и однородном полупространстве. В рамках данного метода изучается общая добротность  $Q_c$ , включающая в себя внутреннее поглощение и рассеяние.

Подробное описание метода и методики расчёта представлено в предыдущих наших исследованиях по западной и восточной частям Северного Кавказа [Zvereva et al., 2023; Зверева, 2023]. Для расчёта выбирается исходная сейсмограмма землетрясения с отметками времён вступления  $P$ - и  $S$ -волн, времени в очаге, задаётся время начала окна коды ( $LT$ ) и длительности окна коды  $CW=30$  с. Амплитуды кода-волн в модели однократного рассеяния могут быть представлены в следующем виде [Aki, Chouet, 1975]:

$$A(f, t) = t^{-\beta} A_0 \exp(-\pi f \kappa) \cdot \exp\left(\frac{-t f \pi}{Q(f)}\right), \quad (1)$$

где  $\kappa$  – коэффициент приповерхностного затухания,  $A_0$  – начальная амплитуда,  $\beta$  – коэффициент геометрического расхождения, равный 1.0 для объёмных волн и 0.5 – для поверхностных волн соответственно.

Логарифмирование соотношения (1) даёт:

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

Далее запись в окне коды фильтруется заданной полосой пропускания 0.5–2.0, 1–4, 2–8, 4–16 и 8–32 Гц с центральными частотами на 1, 2, 4, 8 и 16 Гц. Огибающая коды  $\ln A(f, t) + \beta \ln(t)$ , 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  $Q_c(f)$  на заданной частоте. Значения  $Q_c$  рассчитываются на каждой центральной частоте:  $Q_{f=1}$ ,  $Q_{f=2}$ ,  $Q_{f=4}$ ,  $Q_{f=8}$ ,  $Q_{f=16}$ , затем с использованием аппроксимирующей частотно-зависимой степенной функции определяется соотношение:

$$Q_c = Q_0 f^\alpha, \quad (3)$$

где  $Q_0$  – добротность на опорной частоте и  $\alpha$  – степенной параметр. На практике опорная частота устанавливается равной 1 Гц [Havskov et al., 2010]. 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.

Рассматриваемая модель однократного рассеяния предполагает, что кода-волны рассеива-

ются в эллипсоидальном объёме среды, в фокусах которого расположены очаг землетрясения и сейсмостанция, а расчётные значения  $Q_c$  соотносятся со «средними точками», представляющими собой проекции на поверхности центра эллипсоида [Pulli, 1984]. Расчёт реализован в программном комплексе SEISAN [Havskov et al., 2020].

В качестве исходных данных были использованы записи 800 землетрясений с глубиной  $h=1–45$  км и с  $M=1.8–5.5$  за 2013–2022 гг., зарегистрированных на 53 сейсмических станциях, входящих в сеть ФИЦ ЕГС РАН, эпицентральные расстояния не превышали 50 км [RU ..., 2023] (рис. 1). Основные параметры землетрясений были определены по данным региональных сетей сейсмологических наблюдений ФИЦ ЕГС РАН [Габсатарова и др., 2022]. Следуя особенностям тектонического строения, исследуемый регион Северного Кавказа был разбит на семь отдельных зон: Западный Кавказ (ЗК), Большой Кавказ 1 (БК1), Большой Кавказ 2 (БК2), Лабино-Малкинская зона (ЛМЗ), Терско-Каспийский прогиб (ТКП), Дагестанский клин (ДК), Большой Кавказ 3 (БК3) (рис. 1).

### Анализ данных

Расчёт времени начала окна коды проводился на основании двух заданных критериев. Первый – установка фиксированного времени  $LT$  относительно времени в очаге для всех землетрясений на каждой сейсмической станции, что позволяло усреднять значения, полученные на различных сейсмостанциях. В качестве второго критерия устанавливалось условие, что заданное значение  $LT$  больше, чем двойное время пробега  $S$ -волны для каждой пары станция–событие согласно [Раутиан и др., 1981]. Таким образом, начало расчётного интервала относительно времени в очаге для всех анализируемых событий составляло  $LT=20–150$  с, результаты представлены в табл. 1. Считается, что в коде (особенно на высокой частоте) преобладают  $S$ -волны [Aki, Chouet, 1975; Раутиан и др., 1981], поэтому можно считать, что  $Q_c$  представляет собой добротность  $S$ -волны. Таким образом, для расчёта использовалось значение геометрического расхождения  $\beta=1.0$ , соответствующее объёмным волнам. Однако для сравнения с результатами теоретической модели А.А. Гусева [Gusev, 1995] было также рассчитано значение добротности для геометрического расхождения  $\beta=0.5$ , соответствующее поверхностным волнам.

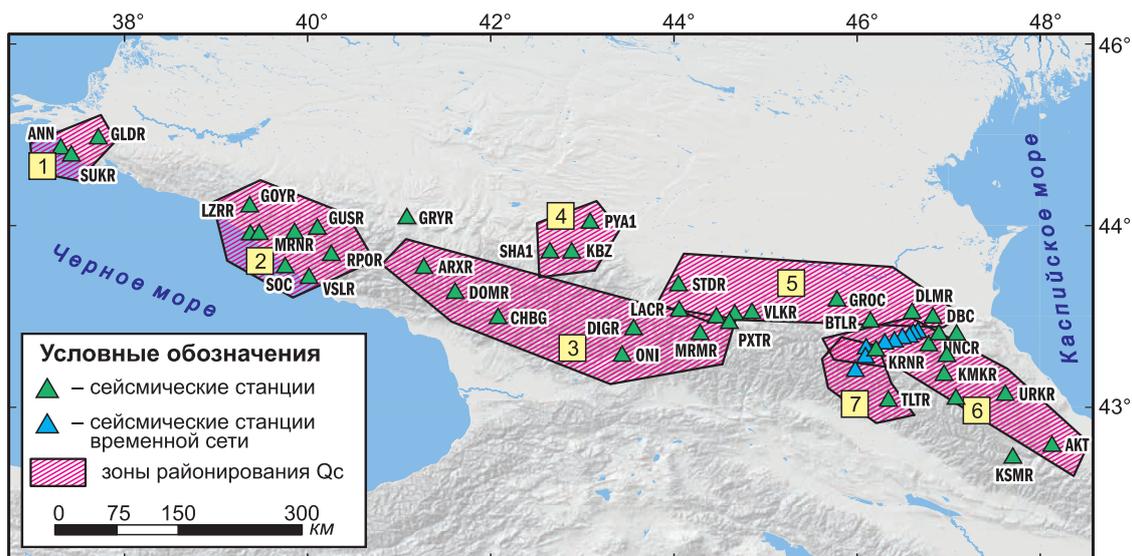


Рис. 1. Карта сейсмических станций и зон районирования  $Q_c$ .

Границы зон: 1 – Западный Кавказ (ЗК), 2 – Большой Кавказ 1 (БК1), 3 – Большой Кавказ 2 (БК2), 4 – Лабино-Малкинская зона (ЛМЗ), 5 – Терско-Каспийский прогиб (ТКП), 6 – Дагестанский клин (ДК), 7 – Большой Кавказ 3 (БК3)

Таблица 1. Средняя зависимость  $Q_0$  и  $\alpha$  от разных значений времени начала окна коды ( $LT$ ) при фиксированной длине окна 30 с

$LT$	Геометрическое расхождение					
	$\beta=0.5$			$\beta=1.0$		
	$N$	$Q_0$	$\alpha$	$N$	$Q_0$	$\alpha$
20	5032	63±13	0.94±0.13	4661	84±21	0.92±0.16
30	9876	74±164	0.95±0.11	9083	94±23	0.95±0.13
40	13093	91±20	0.93±0.12	11158	112±27	0.92±0.13
50	15025	110±27	0.89±0.14	11598	131±36	0.88±0.16
60	16048	121±31	0.86±0.13	11752	138±39	0.86±0.14
70	16186	125±34	0.85±0.14	12021	142±41	0.85±0.15
80	15390	129±36	0.83±0.16	11294	144±43	0.83±0.17
90	14086	132±35	0.83±0.14	10384	146±40	0.82±0.15
100	12208	134±36	0.82±0.16	8848	146±41	0.81±0.17
110	10038	137±41	0.81±0.17	7225	148±47	0.78±0.18
120	8298	137±39	0.81±0.15	5954	144±42	0.80±0.15
130	6689	138±40	0.81±0.14	4849	143±43	0.81±0.14
140	5612	143±41	0.75±0.21	4133	153±45	0.70±0.22
150	4804	146±44	0.73±0.21	3507	154±48	0.69±0.15

Примечание –  $N$  – общее количество значений  $Q_c$  на различных частотах,  $\beta$  – геометрическое расхождение.

Для данных шести зон (рис. 1) использовались значения  $LT=20-90$  с, а для зоны ЗК – до 70 с, поскольку большие времена начала окна дали слишком мало результатов по причине

отсутствия в этой зоне большого числа землетрясений с  $ML=3.0-4.5$ . В табл. 2 также показаны результаты для семи зон при геометрическом расхождении  $\beta=1.0$ .

**Таблица 2.** Зависимость  $Q_0$ ,  $\alpha$  и  $Q_{10}$  от разных значений времени начала окна коды ( $LT$ ) при фиксированной длине окна 30 с для зон БК1, БК2, БК3, ДК, ЗК, ЛМЗ, ТКП

$LT$		20				30			
Зона	$N$	$Q_0$	$\alpha$	$Q_{10}$	$N$	$Q_0$	$\alpha$	$Q_{10}$	
БК1	1122	81±16	0.98±0.09	766±222	1437	96±22	0.99±0.09	940±294	
БК2	407	76±19	0.81±0.14	488±199	822	87±19	0.91±0.11	715±242	
БК3	140	90±20	0.97±0.15	845±353	368	118±30	0.94±0.21	1028±555	
ДК	675	78±16	0.95±0.15	698±283	988	91±20	0.97±0.16	858±374	
ЗК	233	78±15	0.83±0.15	526±206	474	84±22	0.96±0.16	766±354	
ЛМЗ	215	80±14	0.98±0.10	763±226	575	109±21	1.00±0.09	1087±315	
ТКП	584	77±21	1.00±0.12	776±304	1352	98±21	0.88±0.10	745±239	
$LT$		40				50			
Зона	$N$	$Q_0$	$\alpha$	$Q_{10}$	$N$	$Q_0$	$\alpha$	$Q_{10}$	
БК1	1312	116±29	0.95±0.12	1044±391	1006	145±32	0.87±0.11	1076±368	
БК2	706	123±32	0.86±0.16	891±409	117	133±63	0.77±0.29	782±644	
БК3	431	135±32	0.95±0.15	1198±508	571	154±40	0.91±0.17	1238±577	
ДК	962	110±25	0.94±0.16	960±415	835	124±30	0.91±0.18	1018±485	
ЗК	382	97±27	0.99±0.16	953±447	269	112±31	0.98±0.18	1083±535	
ЛМЗ	507	143±30	0.90±0.10	1145±350	355	169±40	0.82±0.11	1122±399	
ТКП	1927	106±27	0.90±0.12	845±300	1699	121±30	0.90±0.12	956±361	
$LT$		60				70			
Зона	$N$	$Q_0$	$\alpha$	$Q_{10}$	$N$	$Q_0$	$\alpha$	$Q_{10}$	
БК1	786	149±42	0.82±0.14	983±425	625	142±48	0.84±0.16	988±490	
БК2	446	128±51	0.87±0.15	947±506	305	138±57	0.80±0.17	869±493	
БК3	230	172±45	0.81±0.18	1119±541	297	163±42	0.68±0.24	781±478	
ДК	639	134±32	0.89±0.16	1036±444	546	139±37	0.86±0.26	1006±652	
ЗК	176	131±38	0.96±0.16	1198±553	117	146±44	0.86±0.14	1051±464	
ЛМЗ	317	153±34	0.86±0.11	1105±372	275	165±34	0.84±0.09	1146±342	
ТКП	1576	120±40	0.92±0.13	1000±450	1374	129±33	0.89±0.10	1004±348	
$LT$		80				90			
Зона	$N$	$Q_0$	$\alpha$	$Q_{10}$	$N$	$Q_0$	$\alpha$	$Q_{10}$	
БК1	475	146±32	0.76±0.12	840±297	350	150±32	0.74±0.13	821±303	
БК2	285	124±61	0.71±0.25	642±489	260	119±32	0.84±0.11	822±299	
БК3	273	143±60	0.74±0.32	783±659	199	167±32	0.71±0.14	846±324	
ДК	450	147±33	0.82±0.17	963±425	346	163±56	0.76±0.25	949±637	
ЗК	—	—	—	—	—	—	—	—	
ЛМЗ	172	200±36	0.76±0.11	1143±349	118	185±27	0.81±0.08	1192±278	
ТКП	1198	134±33	0.88±0.10	1025±348	1061	144±36	0.83±0.14	979±397	

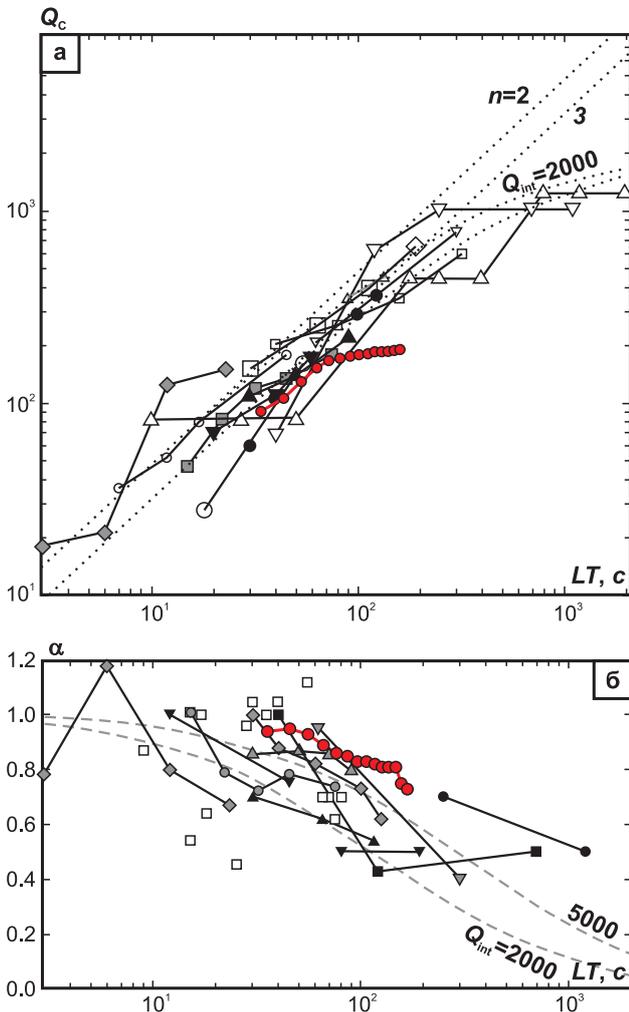
Примечание –  $N$  – общее количество значений  $Q_c$  на различных частотах.

### Результаты и обсуждение

В данном исследовании проведено сравнение с результатами теоретической модели А.А. Гусева [Gusev, 1995], который изучал глобальные мировые данные и обнаружил хорошее совпадение между измеренными значениями  $Q_c$  на частоте 1.5 Гц при  $LT$  от 3 до 2000 с и его теоретическим предсказанием  $Q_c$ . Для сравнения использовались средние значения для всего Северного Кавказа (табл. 1) для геометрического расхож-

дения  $\beta=0.5$  со значением  $LT$  плюс половина длины окна (30 с), т.е. от 35 до 175 с на частоте  $f=1.5$  Гц. Как показано на рис. 2а, наши результаты в диапазоне от 35 до 105 с в среднем окне  $LT$  сравнимы с результатами А.А. Гусева [Gusev, 1995], и значения  $Q_c$  также приближаются к  $Q_1$  при больших значениях  $LT$ . На рис. 2б показана зависимость частотного параметра  $\alpha$  от  $LT$ . Эти значения также сопоставимы. Однако, аналогично исследованию по Северо-Западному Кавказу [Zvereva et al., 2023], мы также не видим

в наших данных непрерывного увеличения  $Q_{f=1.5}$  с течением времени и, начиная с  $LT=60$  с,  $Q_c$  перестаёт непрерывно увеличиваться и достигает плато или достигает насыщения.



**Рис. 2.** Наблюдённые значения  $Q_c$  (а) и частотный параметр  $\alpha$  (б) в разных тектонических регионах в зависимости от времени начала окна коды ( $LT$ ) для  $f=1.5$  Гц.

Рисунок изменён из [Gusev, 1995]. Красные кривые – диапазон результатов Северного Кавказа

Для семи зон (рис. 1, 2) также отдельно было проведено исследование зависимости  $Q_c$  и частотного параметра  $\alpha$  от  $LT$  (при геометрическом расхождении  $\beta=1.0$ ). С увеличением  $LT$ , в рамках модели однократного рассеяния, границы отобранного объёма среды на поверхности имеют проекцию радиусом около 180 км [Zvereva et al., 2023; Зверева, 2023]. Это одинаково для всех зон, так как все события отображены с эпицентрными расстояниями, не превышающими 50 км. Из рис. 3 видно, что значения  $Q$  в целом растут с увеличением  $LT$  до определённого уровня, после которого формируется плато («насыщение»).

Также замечено, что существует разница для  $Q_0$  ( $Q$  на частоте 1 Гц) и  $Q_{f=10}$ , где  $Q_{f=10}$  достигает насыщения при меньших  $LT$ , чем  $Q_0$ , что, следовательно, приводит к уменьшению  $\alpha$  при более длительных временных интервалах  $LT$ .

Результаты для  $Q_0$  (рис. 3а) показывают увеличение  $Q_0$  с увеличением  $LT$  для всех областей, как и предсказывал А.А. Гусев [Gusev, 1995], за исключением зон БК1 и БК2, где наблюдается насыщение примерно через 50 с. Три зоны (ДК, ТКП и ЗК) имеют схожий характер изменения добротности  $Q_0$  – она плавно увеличивается по мере увеличения  $LT$ , несмотря на то, что для зоны ЗК было возможно рассчитать  $Q_c$  только для  $LT$  до 70 с. Зоны ЛМЗ и БК3 характеризуются самыми высокими значениями  $Q_c$ , однако для зоны БК3, начиная с  $LT=70$  с, добротность уменьшается и становится близкой к другим зонам.

На рис. 3 б показана зависимость  $Q_{f=10}$  от  $LT$  и видно, что  $Q_{f=10}$  также увеличивается с  $LT$ , но начиная с более низких значений  $LT$ , в отличие от  $Q_0$ . Для области ЛМЗ  $Q_{f=10}$  перестаёт увеличиваться при  $LT$  больше или равном 40 с, в то время как для региона ЗК оно достигает максимума при 60 с. Для остальных зон в целом значения  $Q_{f=10}$  выходят на уровень плато, начиная с  $LT=50$  с. Все зоны, в тектоническом плане относящиеся к территории Большого Кавказа (БК1, БК2, БК3), имеют схожий характер зависимости  $Q_{f=10}$  от  $LT$  – сначала резкий рост значений с выходом на уровень плато, а затем резкое снижение. Зоны ЛМЗ, ТКП и ДК с момента наступления насыщения  $Q_{f=10}$  сохраняют близкие значения для всех последующих  $LT$ , несмотря на разные значения  $LT$ , при которых наступает насыщение. Разница в значениях  $LT$ , на которых наступает насыщение, для разных частот может быть связана с размером и распределением неоднородностей в пространстве, поскольку, согласно [Aki, Chouet, 1975; Aki, Richards, 1980; Paymuan и др., 1981], кода-волны на разных частотах рассеиваются от неоднородностей разного размера.

В работе [Calvet, Margerin, 2013] М. Кальве и Л. Маржера объясняют увеличение  $Q_c$  с увеличением  $LT$  и насыщением другой моделью рассеяния без учёта затухания, зависящего от глубины, предполагая анизотропное многократное рассеяние и не зависящее от глубины внутреннее поглощение  $Q_i$ . В их модели предполагается, что при больших значениях  $LT$   $Q_c$  приближается к  $Q_i$  в предположении, что при больших  $LT$  кода-волны переходят в диффузионный тип рассеяния. Модель А.А. Гусева [Gusev, 1995] также

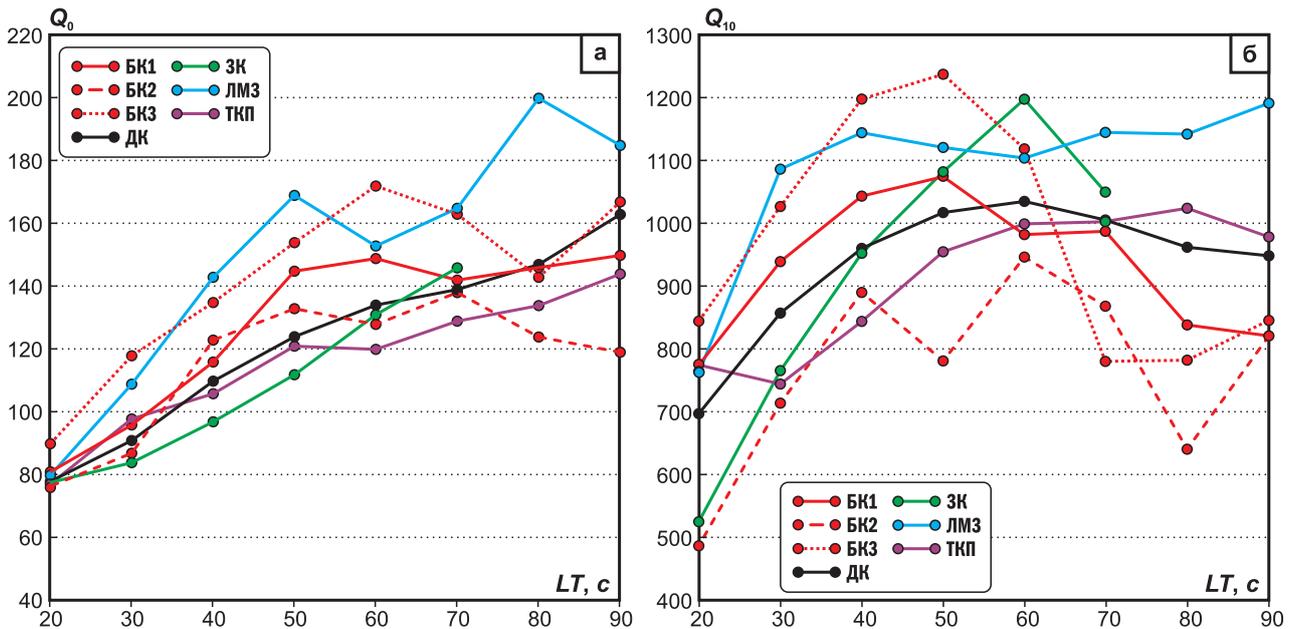


Рис. 3. Зависимость  $Q_0$  (а) и  $Q_{f=10}$  (б) от разных значений времени начала окна коды ( $LT$ ) при фиксированной длине окна 30 с для зон БК1, БК2, БК3, ДК, ЗК, ЛМ3, ТКП

объясняет увеличение  $Q_c$  с увеличением  $LT$ , которое приближается к  $Q_i$  при больших значениях  $LT$  и предсказывает изменение  $\alpha$  (рис. 2).

Рассматриваемая нами простая модель однократного рассеяния имеет ограничения, поскольку не учитываются такие факторы, как скорости распространения волн и многократное рассеяние, которые также могут оказывать влияние на зависимость добротности от  $LT$  [Sato et al., 2012]. Однако, несмотря на это, предполагаем, что простая модель неоднородности, зависящей от глубины, верна, и считаем, что при больших значениях  $LT$  энергия будет распространяться и в мантии, поскольку независимо от модели при больших значениях  $LT$  будут отобраны более глубокие части литосферы, даже если наблюдения могут быть смоделированы с помощью не зависящего от глубины затухания и другой модели рассеяния.

На рис. 4 представлены графики зависимости коэффициента затухания от  $LT$  на каждой частоте по отдельности. При  $LT$  60–150 с эллипсоидальный объём среды имеет нижнюю границу, приблизительно равную 138–192 км, т.е. значительная часть кода-волн проходит через мантию. Известно, что мантия более однородна, чем земная кора, за счёт закрытия трещин при возрастающем давлении и плавлении вещества при повышенных температурах [Dasovic et al., 2013] и, таким образом, происходят меньшие потери энергии при рассеянии. Данный факт находит подтверждение и в скоростных моделях

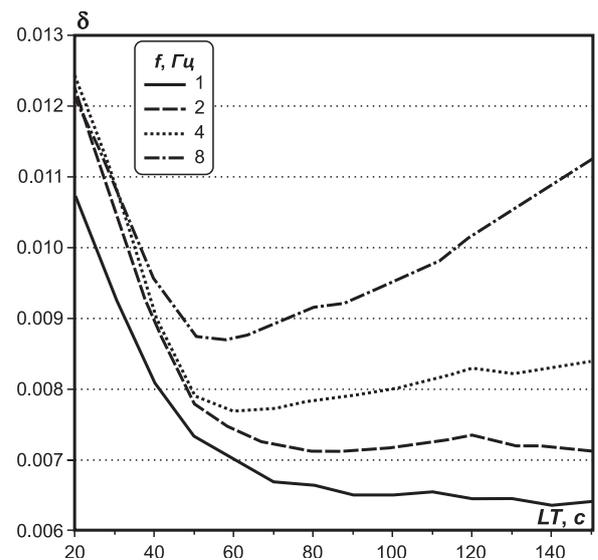


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента затухания  $\delta$  от  $LT$  на каждой центральной частоте  $f$

литосферы Северного Кавказа [Pavlenkova, 2012; Koulakov et al., 2012].

Из рис. 4 видно, что на низких частотах 1 и 2 Гц, начиная с  $LT=60$  с, значение коэффициента затухания постоянно, на частоте 4 Гц есть незначительный рост, а на высокой частоте 8 Гц наблюдается резкое увеличение. Результаты расчёта добротности также показывают, что  $Q_c$  меньше зависит от частоты, что отражается в уменьшении значения  $\alpha$  с увеличением  $LT$ ,  $\alpha=0$  указывает на отсутствие частотной зависимости.

Это общее наблюдение может быть объяснено как моделями [Calvet, Margerin, 2013] и [Gusev, 1995], так и тем, что при малых значениях  $LT$  затухание волн происходит, в первую очередь, в коре, поэтому количество энергии, теряемое в мантии, зависит от мощности земной коры. Например, в своей работе [Dasovic et al., 2013] авторы показали, что для  $LT$  50–70 с существует чёткая положительная корреляция между  $\alpha$  и глубиной залегания поверхности Мохоровичича, при этом для больших значений  $LT$  корреляция не обнаружена, что указывает на то, что в результатах преобладает рассеяние в мантии. Таким образом, при больших значениях  $LT$  преобладает влияние мантии, и, исходя из постоянного значения коэффициента затухания при  $LT > 60$  с, можно сделать вывод, что не происходят потери энергии относительно меньшей частоты, поскольку структура мантии более однородна и в ней не присутствуют крупномасштабные неоднородности.

### Заключение

Исследование  $Q_c$  и частотного параметра  $\alpha$  для разных значений окна начала коды подтвердило наличие зависимости добротности  $Q_c$  по кода-волнам от времени начала коды землетрясений Северного Кавказа, как это было показано другими авторами в других регионах. Предполагается, что с увеличением  $LT$  кода-волны рассеиваются в эллипсоидальном объёме среды большего размера и глубины. Было выявлено, что, начиная для  $LT$  от 20 до 60 с,  $Q_c$  (рис. 2) непрерывно увеличивается, а затем её рост останавливается и приобретает постоянное значение, формируя плато. Также замечено, что на частоте 10 Гц ( $Q_{10}$ ) такое насыщение наступает при меньших значениях  $LT$ , в отличие от добротности на частоте 1 Гц ( $Q_0$ ) (рис. 3). Разница в значениях  $LT$ , при которых наступает насыщение для разных частот, может быть связана с распределением неоднородностей в пространстве и их размером.

При больших значениях  $LT$  энергия будет распространяться и в мантии, поскольку, независимо от модели рассеяния, будут отобраны более глубокие части литосферы, и влияние мантии будет преобладающим. Это отражается и в анализе зависимости коэффициента затухания от  $LT$  (рис. 4), где видно, что для частот до 4 Гц, начиная с  $LT=60$  с, значение постоянно, что подтверждает преобладающее влияние мантии, поскольку не происходит рассеяние на крупномасштабных неоднородностях, что говорит о более однородной её структуре. Учитывая

это, для изучения затухания в земной коре нами рекомендуется использовать значения  $LT=30$  с.

### Глоссарий:

$Q_c$  – добротность, рассчитанная методом огибающих кода-волн;

$Q_s$  – добротность, рассчитанная по  $S$ -волнам;

$Q_i$  – добротность среды, описывающая потерю энергии вследствие не упругости среды или внутреннего трения при распространении волн (собственное поглощение);

$Q_{sc}$  – добротность среды, связанная с уменьшением амплитуды сейсмических волн в результате рассеяния энергии на разномасштабных локальных неоднородностях, обладающих резонансными свойствами;

$Q_0$  – добротность на опорной частоте  $f=1$  Гц, заданная частотно-зависимой аппроксимирующей функцией  $Q_c=Q_0 f^\alpha$ ;

$Q_{f=n}$  – добротность, рассчитанная на одной выбранной центральной частоте  $N$  Гц.

**Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 075-00682-24, а также 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-rg.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).**

### Литература

- Габсатарова И.П., Мехрюшев Д.Ю., Королецки Л.Н., Адилев А.З., Магомедов Х.Д., Саяпина А.А., Багаева С.С., Походенко В.П., Иванова Л.Е. Северный Кавказ // Землетрясения России в 2020 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 17–24. – EDN: VAZPFU
- Зверева А.С. Опыт использования программного комплекса SEISAN для расчёта добротности литосферы Северного Кавказа // Двадцать четвёртая уральская молодёжная научная школа по геофизике: Сборник научных материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2023. – С. 59–64. – URL: [http://pts.mi-perm.ru/conf/downloads/SbornikUYS\\_2023\\_final.pdf](http://pts.mi-perm.ru/conf/downloads/SbornikUYS_2023_final.pdf), свободный.
- Копничев Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля / Отв. ред. А.В. Николаев. – М.: Наука, 1985. – 176 с. – EDN: YSXBTK
- Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С., Земцова А.Г., Проскурин А.П., Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.Н., Синельникова Л.Г., Филина А.Г., Шенгелия И.С. Экспериментальные исследования

- сейсмической коды. — М.: Наука, 1981. — 143 с. — EDN: TQPOBT
- 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 1. — 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.
- Bianco F., Del Pezzo E., Castellano M., Ibanez J., di Luccio F.* Separation of intrinsic and scattering seismic attenuation in the Southern Apennine zone, Italy // *Geophysical Journal International.* — 2002. — V. 150, N 1. — P. 10–22.
- Biswas K., Kumar M., Mandal P.* Lapse time dependent coda-Q (Qc) in the Kachchh, rift zone, Gujarat, India // *Natural Hazards.* — 2016. — V. 81, N 3. — P. 1589–1610. — DOI: 10.1007/s11069-016-2147-x
- Blanke A., Kwiatek G., Martinez-Garzon P., Bohnhoff M.* Sensitivity and stability analysis of coda quality factors at the Geysers Geothermal field, California // *Bulletin of the Seismological Society of America.* — 2019. — V. 109, N 3. — P. 959–975. — DOI: 10.1785/0120180219
- Calvet M., Margerin L.* Lapse-time dependence of coda Q: Anisotropic multiple scattering models and application to the Pyrenees // *Bulletin of the Seismological Society of America.* — 2013. — V. 103. — P. 1993–2010. — DOI: 10.1785/0120120239
- Carlote E., Sato H.* Spatial distribution of scattering loss and intrinsic absorption of short-period S waves in the lithosphere of Japan on the basis of the Multiple Lapse Time Window Analysis of Hi-net data // *Geophysical Journal International.* — 2010. — V. 180, N 1. — P. 268–290. — DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04394.x
- Dainty A.M.* Scattering model to explain seismic Q observations in the lithosphere between 1 and 20 Hz // *Geophysical Research Letters.* — 1981. — V. 8. — P. 1126–1128. — DOI: 10.1029/GL008i011p01126
- Das R., Mukhopadhyay S., Singh R.K., Baidya P.R.* Lapse time and frequency-dependent coda wave attenuation for Delhi and its surrounding regions // *Tectonophysics.* — 2018. — V. 738. — P. 51–63. — DOI: 10.1016/j.tecto.2018.05.007
- Dasovic I., Herak M., Herak D.* Coda-Q and its lapse time dependence analysis in the interaction zone // *Physics and Chemistry of the Earth.* — 2013. — V. 63. — P. 47–54. — DOI: 10.1016/j.pce.2013.03.001
- Dobrynina A.A., Sankov V.A., Chechelnitzsky V.V.* Seismic quality factor of the lithosphere of the southwestern flank of the Baikal rift system // *Russian Geology and Geophysics.* — 2011. — V. 52, N 5. — P. 555–564. — DOI: 10.1016/j.rgg.2011.04.008. — EDN: MWUREO
- Dobrynina A.A., Sankov V.A., Chechelnitzsky V.V., Deverchere J.* Spatial changes of seismic attenuation and multiscale geological heterogeneity in the Baikal rift and surroundings from analysis of coda waves // *Tectonophysics.* — 2016. — V. 675, N 7. — P. 50–68. — DOI: 10.1016/j.tecto.2016.03.010
- Fehler M., Sato H.* Coda // *Pure and Applied Geophysics.* — 2003. — V. 160. — P. 541–554. — DOI: 10.1007/PL00012549
- Gupta S.C., Teotia S.S., Rai S.S., Gautam N.* Coda Q estimates in the Koyna region, India // *Pure and Applied Geophysics.* — 1998. — V. 153. — P. 713–731. — DOI: 10.1007/s000240050216
- Gusev A.* Vertical profile of turbidity and coda Q // *Geophysical Journal International.* — 1995. — V. 123. — P. 665–672. — DOI: 10.1111/J.1365-246X.1995.TB06882.X
- Gusev A.A., Abubakirov I.R.* Monte-Carlo simulation of record envelope of a near earthquake // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* — 1987. — V. 49, Iss. 1-2. — P. 30–36. — DOI: 10.1016/0031-9201(87)90130-0
- Havskov J., Malone S., McCloud D., Crosson R.* Coda Q for the state of Washington // *Bulletin of the Seismological Society of America.* — 1989. — V. 79, N 4. — P. 1024–1038. — DOI: 10.1785/BSSA0790041024
- Havskov J., Ottemoller L.* Routine data processing in earthquake seismology: with sample data, exercises and software. — Berlin: Springer Science & Business Media, 2010. — 347 p.
- Havskov J., Sorensen M., Vales D., Ozyazicioglu M., et al.* 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., Voss P., Ottemoller L.* Seismological observatory software: 30 Yr of SEISAN // *Seismological Research Letters.* — 2020. — V. 91 (3), N 1. — P. 1846–1852. — DOI: 10.1785/0220190313
- Ibanez J., Pezzo E., Miguel F., Herraiz M., et al.* Depth-dependent seismic attenuation in the Granada zone (Southern Spain) // *Bulletin of the Seismological Society of America.* — 1990. — V. 80, N 5. — P. 1232–1244. — DOI: 10.1785/BSSA0800051232
- Irandoost M.A., Sobouti F., Rahimi H.* Lateral and depth variations of coda Q in the Zagros region of Iran // *Journal of Seismology.* — 2016. — V. 20. — P. 197–211. — DOI: 10.1007/s10950-015-9520-1
- 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, N 2. — P. 327–337. — DOI: 10.5194/se-3-327-2012

- Novelo-Casanova D.A., Polanco-Rivera E., Suárez G., Martínez F., Moreta A.M.* Seismic S-wave coda attenuation in the Dominican Republic as a tool for seismic hazard mitigation // *Natural Hazards*. – 2020. – V. 103. – P. 2849–2863. – DOI: 10.1007/s11069-020-04105-6
- Pavlenkova G.A.* Crustal structure of the Caucasus from the Stepnoe-Bakuriani and Volgograd-Nakhichevan DSS profiles (reinterpretation of the primary data) // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2012. – V. 48, N 5. – P. 375–384. – DOI: 10.1134/S1069351312040040. – EDN: PDPEJX
- Pulli J.* Attenuation of coda waves in New England // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1984. – V. 74, N 4. – P. 1149–1166. – DOI: 10.1785/BSSA0740041149
- Rautian T.G., Khalturin V.I.* The use of coda for determination of the earthquake source spectrum // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1978. – V. 68, N 4. – P. 923–948. – DOI: 10.1785/BSSA0680040923
- RU: Seismic network of the European part of the Russian Federation.* Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GSRAS), Russian Federation // *International Federation of Digital Seismograph Networks [Site]*. – URL: <https://www.fdsn.org/networks/detail/RU/> (дата обращения 20.09.2023).
- Sato H., Fehler M., Maeda T.* Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous Earth: second edition. – Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2012. – 496 p. – DOI: 10.1007/978-3-642-23029-5
- Shang T., Gao L.* Transportation theory of multiple scattering and its application to seismic coda waves of impulsive source // *Scientia Sinica. Series B, Chemical, biological, agricultural, medical & earth sciences*. – 1988. – V. 31. – P. 1503–1514.
- Shapiro N.M., Campillo M., Margerin L., Singh S.K., et al.* The energy partitioning and the diffusive character of the seismic coda // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2000. – V. 90, N 3. – P. 655–665. – DOI: 10.1785/0119990021
- Sivaram K., Gupta S.* Frequency-dependent attenuation characteristics of coda and body waves in the Kumaun Himalaya: Implications for regional geology and seismic hazards // *Pure and Applied Geophysics*. – 2022. – V. 179. – P. 949–972. – DOI: 10.1007/s00024-022-02963-8
- Xie J., Mitchell B.J.* Attenuation of multiphase surface waves in the Basin and Range province, part I: Lg and Lg coda // *Geophysical Journal International*. – 1990. – V. 102, N 1. – P. 121–137.
- Zeng Y., Su F., Aki K.* Scattered wave energy propagation in a random isotropic scattering medium: 1. Theory // *Journal of Geophysical Research*. – 1991. – V. 96 (B1). – P. 607–619. – DOI: 10.1029/90JB02012
- Zvereva A.S., Havskov J., Gabsatarova I.P.* Regional variation of coda Q in Northwest Caucasus // *Journal of Seismology*. – 2023. – V. 27. – P. 363–384. – DOI: 10.1007/s10950-023-10154-8

### Сведения об авторе

**Зверева Анастасия Сергеевна**, мл. науч. сотр. Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Пермь, Россия. E-mail: [zvereva.as59@gmail.com](mailto:zvereva.as59@gmail.com)

## Coda Q lapse time dependence in the lithosphere of the North Caucasus

© 2024 A.S. Zvereva

GS RAS, Perm, Russia

Received November 20, 2023

**Abstract** The coda Q calculated results for the North Caucasus region were compared with the theoretical model of vertical profile of turbidity and  $Q_c$  by A.A. Gusev (1995). It was established that, in general, there is a correspondence between the average  $Q_c$  values of the North Caucasus with the predicted A.A. Gusev model. However, there are also differences, for lapse time starting from 60 s,  $Q_c$  stops continuously increasing and forms a plateau or reaches “saturation”. This effect is associated with the propagation of seismic waves in the mantle, the structure of which is more viscous and homogeneous than the earth’s crust. As a result, of such features, the total energy loss due to attenuation is dominating by internal absorption, which has a constant value, and scattering is minimal. due to the viscous and homogeneous structure of the mantle. For smaller zones associated with different tectonic structures, the “saturation” effect is also observing, but at other  $LT$  values, which may be due to the distribution of heterogeneities in medium and their size.

**Keywords** Coda, earthquakes, North Caucasus, theoretical model, lapse time of coda window.

**For citation** Zvereva, A.S. (2024). [Coda Q lapse time dependence in the lithosphere of the North Caucasus]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 6(1), 80-92. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.1.05>. EDN: NIHHPB

### References

- 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(1), 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.
- Bianco, F., Del Pezzo, E., Castellano, M., Ibanez, J., & di Luccio, F. (2002). Separation of intrinsic and scattering seismic attenuation in the Southern Apennine zone, Italy. *Geophysical Journal International*, 150(1), 10-22.
- Biswas, K., Kumar, M., & Mandal, P. (2016). Lapse time dependent coda-Q ( $Q_c$ ) in the Kachchh, rift zone, Gujarat, India. *Natural Hazards*, 81(3), 1589-1610. DOI: [10.1007/s11069-016-2147-x](https://doi.org/10.1007/s11069-016-2147-x)
- Blanke, A., Kwiatek, G., Martinez-Garzon, P., & Bohnhoff, M. (2019). Sensitivity and stability analysis of coda quality factors at the Geysers Geothermal field, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(3), 959-975. DOI: [10.1785/0120180219](https://doi.org/10.1785/0120180219)
- Calvet, M., & Margerin, L. (2013). Lapse-time dependence of coda Q: Anisotropic multiple scattering models and application to the Pyrenees. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 1993-2010. DOI: [10.1785/0120120239](https://doi.org/10.1785/0120120239)
- Carlote, E., & Sato, H. (2010). Spatial distribution of scattering loss and intrinsic absorption of short-period S waves in the lithosphere of Japan on the basis of the Multiple Lapse Time Window Analysis of Hi-net data. *Geophysical Journal International*, 180(1), 268-290. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2009.04394.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04394.x)
- Dainty, A.M. (1981). Scattering model to explain seismic Q observations in the lithosphere between 1 and 20 Hz. *Geophysical Research Letters*, 8, 1126-1128. DOI: [10.1029/GL008i011p01126](https://doi.org/10.1029/GL008i011p01126)
- Das, R., Mukhopadhyay, S., Singh, R.K., & Baidya, P.R. (2018). Lapse time and frequency-dependent coda wave attenuation for Delhi and its surrounding regions. *Tectonophysics*, 738, 51-63. DOI: [10.1016/j.tecto.2018.05.007](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.05.007)
- Dasovic, I., Herak, M., & Herak, D. (2013). Coda-Q and its lapse time dependence analysis in the interaction zone. *Physics and Chemistry of the Earth*, 63, 47-54. DOI: [10.1016/j.pce.2013.03.001](https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.03.001)
- Dobrynina, A.A., Sankov, V.A., Chechelnitzsky, V.V., & Deverchere, J. (2016). Spatial changes of seismic attenuation and multiscale geological heterogeneity

- in the Baikal rift and surroundings from analysis of coda waves. *Tectonophysics*, 675(7), 50-68. DOI: 10.1016/j.tecto.2016.03.010
- Dobrynina, A.A., Sankov, V.A., & Chechelnitzsky, V.V. (2011). Seismic quality factor of the lithosphere of the southwestern flank of the Baikal rift system. *Russian Geology and Geophysics*, 52(5), 555-564. DOI: 10.1016/j.rgg.2011.04.008. EDN: MWUREO
- Fehler, M., & Sato, H. (2003). Coda. *Pure and Applied Geophysics*, 160, 541-554. DOI: 10.1007/PL00012549
- Gabsatarova, I.P., Mehryushev, D.Yu., Korolecki, L.N., Adilov, A.Z., Magomedov, H.D., Sayapina, A.A., Bagayeva, S.S., Pokhodenko, V.P., & Ivanova, L.E. (2022). [North Caucasus]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2020 godu* [Earthquakes in Russia in 2020] (pp. 17-24). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: VAZPFU
- Gupta, S.C., Teotia, S.S., Rai, S.S., & Gautam, N. (1998). Coda Q estimates in the Koyna region, India. *Pure and Applied Geophysics*, 153, 713-731. DOI: 10.1007/s000240050216
- Gusev, A. (1995). Vertical profile of turbidity and coda Q. *Geophysical Journal International*, 123, 665-672. DOI: 10.1111/J.1365-246X.1995.TB06882.X
- Gusev, A.A., & Abubakirov, I.R. (1987). Monte-Carlo simulation of record envelope of a near earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 49(1-2), 30-36. DOI: 10.1016/0031-9201(87)90130-0
- Havskov, J., Malone, S., McCloud, D., & Crosson, R. (1989). Coda Q for the state of Washington. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79(4), 1024-1038. DOI: 10.1785/BSSA0790041024
- Havskov, J., & Ottemoller, L. (2010). *Routine data processing in earthquake seismology: with sample data, exercises and software*. Berlin: Springer Science & Business Media, 347 p.
- Havskov, J., Sorensen, M., Vales, D., Ozyazicioglu, M., et al. (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., Voss, P., & Ottemoller, L. (2020). Seismological observatory software: 30 Yr of SEISAN. *Seismological Research Letters*, 91(1), 1846-1852. DOI: 10.1785/0220190313
- Ibanez, J., Pezzo, E., Miguel, F., Herraiz, M., et al. (1990). Depth-dependent seismic attenuation in the Granada zone (Southern Spain). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(5), 1232-1244. DOI: 10.1785/BSSA0800051232
- Irاندoust, M.A., Sobouti, F., & Rahimi, H. (2016). Lateral and depth variations of coda Q in the Zagros region of Iran. *Journal of Seismology*, 20, 197-211. DOI: 10.1007/s10950-015-9520-1
- Kopnichev, Yu.F. (1985). *Korotkoperiodnyye seismicheskie volnovye 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
- Koulakov, I., Zabelina, I., Amanatashvili, I., & Meskhia, V. (2012). Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. *Solid Earth*, 3(2), 327-337. DOI: 10.5194/se-3-327-2012
- Novelo-Casanova, D.A., Polanco-Rivera, E., Suárez, G., Martinez, F., & Moreta, A.M. (2020). Seismic S-wave coda attenuation in the Dominican Republic as a tool for seismic hazard mitigation. *Natural Hazards*, 103, 2849-2863. DOI: 10.1007/s11069-020-04105-6
- Pavlenkova, G.A. (2012). Crustal structure of the Caucasus from the Stepnoe-Bakuriani and Volgograd-Nakhichevan DSS profiles (reinterpretation of the primary data). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 48(5), 375-384. DOI: 10.1134/S1069351312040040. EDN: PDPEJX
- Pulli, J. (1984). Attenuation of coda waves in New England. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(4), 1149-1166. DOI: 10.1785/BSSA0740041149
- Rautian, T.G., & Khalturin, V.I. (1978). The use of coda for determination of the earthquake source spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68(4), 923-948. DOI: 10.1785/BSSA0680040923
- Rautian, T.G., Khalturin, V.I., Zakirov, M.S., Zemtsova, A.G., Proskurin, A.P., Pustovitenko, B.G., Pustovitenko, A.N., Sinelnikova, L.G., Filina, A.G., & Shengelia, I.S. (1981). *Eksperimental'nye issledovaniia seismicheskoi kody* [Experimental studies of seismic codes]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 143 p. (In Russ.). EDN: TQPOBT
- RU: Seismic network of the European part of the Russian Federation (2023). Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GSRAS), Russian Federation. *International Federation of Digital Seismograph Networks*. Retrieved from <https://www.fdsn.org/networks/detail/RU/>
- Sato, H., Fehler, M., & Maeda, T. (2012). *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous Earth: second edition*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 496 p. DOI: 10.1007/978-3-642-23029-5
- Shang, T., & Gao, L. (1988). Transportation theory of multiple scattering and its application to seismic coda waves of impulsive source. *Scientia Sinica. Series B, Chemical, biological, agricultural, medical & earth sciences*, 31, 1503-1514.
- Shapiro, N.M., Campillo, M., Margerin, L., Singh, S.K., et al. (2000). The energy partitioning and the diffusive character of the seismic coda. *Bulletin of the*

- Seismological Society of America*, 90(3), 655-665. DOI: 10.1785/0119990021
- Sivaram, K., & Gupta, S. (2022). Frequency-dependent attenuation characteristics of coda and body waves in the Kumaun Himalaya: Implications for regional geology and seismic hazards. *Pure and Applied Geophysics*, 179, 949-972. DOI: 10.1007/s00024-022-02963-8
- Xie, J., & Mitchell, B.J. (1990). Attenuation of multiphase surface waves in the Basin and Range province, part I: Lg and Lg coda. *Geophysical Journal International*, 102(1), 121-137.
- Zeng, Y., Su, F., & Aki, K. (1991). Scattered wave energy propagation in a random isotropic scattering medium: 1. Theory. *Journal of Geophysical Research*, 96(B1), 607-619. DOI: 10.1029/90JB02012
- Zvereva, A.S., Havskov, J., & Gabsatarova, I.P. (2023). Regional variation of coda Q in Northwest Caucasus. *Journal of Seismology*, 27, 363-384. DOI: 10.1007/s10950-023-10154-8
- Zvereva, A.S. (2023). [Experience in using the SEISAN software package for calculating the Q-factor of the lithosphere of the North Caucasus]. In *Dvadtsat' chetvertaia ural'skaia molodezhnaia nauchnaia shkola po geofizike: Sbornik nauchnykh materialov* [Twenty-fourth Ural Youth Scientific School of Geophysics: Collection of scientific materials] (pp. 59-64). Perm, Russia: MIRAS Publ. (In Russ.). Available at: [http://pts.mi-perm.ru/conf/downloads/SbornikUYS\\_2023\\_final.pdf](http://pts.mi-perm.ru/conf/downloads/SbornikUYS_2023_final.pdf)

### Information about author

**Zvereva Anastasia Sergeevna**, Junior Researcher of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Perm, Russia. E-mail: zvereva.as59@gmail.com