

УДК 550.34

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРА ДОБРОТНОСТИ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ВДОЛЬ ПРОФИЛЯ «КАРЬЕР «МИХАЙЛОВСКИЙ» – МСГ «МИХНЕВО»»

© 2023 г. И. А. Санина¹, Н. Л. Константиновская¹,*, О. В. Овчинникова¹,
О. А. Усольцева¹, С. Г. Волосов¹, А. Г. Гоев¹, С. А. Тарасов¹,
Н. А. Юдочкин¹, З. З. Шарафиев¹

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: konstnat@list.ru

На основе регистрации амплитуд продольных и поперечных волн вдоль профиля «Карьер «Михайловский» – малоапертурная сейсмическая группа «Михнево»» (МСГ «Михнево») от двух карьерных взрывов получены оценки параметра добротности. Регистрация велась трехкомпонентными датчиками, что позволило оценить значения Q по трем составляющим. Были использованы две методики – оценка амплитудного коэффициента затухания и отношение амплитуд спектральных составляющих в зависимости от расстояния, широко применяемые ранее к интерпретации данных глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). В результате получены средние значения параметра добротности по двум методикам – $Q_{\text{ср}}$ составляет порядка для P -волн = 376 и для S -волн: $Q_{\text{SE}} = 1068$ и $Q_{\text{SN}} = 897$.

Ключевые слова: добротность, затухание, МСГ «Михнево», карьерные взрывы, амплитуды продольных и поперечных сейсмических волн.

Для цитирования: Санина И.А., Константиновская Н.Л., Овчинникова О.В., Усольцева О.А., Волосов С.Г., Гоев А.Г., Тарасов С.А., Юдочкин Н.А., Шарафиев З.З. Оценка параметра добротности по данным наблюдений вдоль профиля «Карьер «Михайловский» – МСГ «Михнево»» // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 2. С. 23–37. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_2_23

Введение

Добротность (Q), совместно со скоростями сейсмических волн и плотностью, является важнейшей физической характеристикой геологической среды. Величина добротности определяется по формуле:

$$Q(\omega) = 2\pi E / \Delta E, \quad (1)$$

где E – вся излученная энергия, а ΔE – энергия, поглощенная и рассеянная средой за один период колебаний с угловой частотой ω [Аки, Ричардс, 1983]. Таким образом, в данном выражении параметр Q зависит от двух основных факторов – собственного поглощения энергии в среде за счет ее неидеальной упругости и потерей энергии, обусловленной рассеянием на неоднородностях. Изменение амплитуды сейсмических волн по мере их распространения определяется, как правило, коэффициентом затухания α (размерность км^{-1}), являющийся обратной величиной параметра добротности Q .

Особо важную роль величина коэффициента затухания играет при оценке сейсмического воздействия на здания и сооружения, определении магнитуды природных и техногенных сейсмических источников, моделировании теоретических сейсмограмм; по значениям коэффициента затухания можно стратифицировать кору и мантию Земли, а также проводить мониторинг состояния геологической среды.

В настоящее время наиболее активно используются несколько подходов к оценке этого параметра, а именно – основанных на отношении амплитуд объёмных волн, например, Pn и Sn [Копничев, Соколова, 2019], спектральной инверсии [Sychev et al., 2017], использовании коды поверхностной волны Lg [Хие,

Nuttli, 1988], коде объёмных S -волн [Aki, 1969; Aki, Chouet, 1975; Sato, 1977; 1988], математическом моделировании волновых форм [Sanborn, 2017] и др. Применение этих методов позволило получить значения параметра добротности в сейсмически активных районах [Aki, 1969; Aki, Chouet, 1975; Sychev, 2017; Добрынина и др., 2019; Копничев, Соколова, 2019; Аптикаева, 2020] и связанных с ними особенностей сейсмического режима и геологического строения.

Центральная часть Восточно-Европейской платформы по изученности параметра добротности является практически «белым» пятном на территории Российской Федерации. Низкий уровень естественной сейсмичности и, как следствие, редкая сейсмическая сеть препятствовали детальному изучению этого параметра.

Нам известны две работы по оценке коэффициента затухания и добротности на этой территории. Первая выполнена по данным наблюдений вдоль профиля Воркута – Кострома во второй половине прошлого века [Egorkin, Kup, 1978]. Использовались результаты регистрации сейсмических волн от крупных промышленных взрывов сейсмостанциями «Тайга» при фильтрации, имеющей максимум частотной характеристики в интервале 4–5 Гц. Были получены величины добротности в диапазоне 190–250 по первым вступлениям P -волн для частот от 2.5 до 7.5 Гц и эпицентральных расстояний 255–654 км для Московской синеклизы при средней скорости P -волны – 8.4 км/с. Вторая – по результатам ГСЗ с использованием промышленных взрывов вдоль профилей, расположенных на Воронежском кристаллическом массиве [Дубянский, Марычев, 2016]. Величина добротности, на основе анализа коды волны S , в этой работе оценивается в интервале от 790 до 1570 в зависимости от глубины проникновения сейсмического луча и эпицентрального расстояния для частот около 10 Гц.

По данным регистрации малоапертурной сейсмической группы (МСГ) «Михнево» [Санина и др., 2019; Санина, Константиновская, 2022] основная масса сейсмических событий на территории ВЕП представлена взрывами на карьерах по добыче полезных ископаемых: железной руды, известняка, доломита, гранита и т.д. Энергия этих взрывов оценивается от 1 до 3.2 магнитудной шкалы по P -волнам, а суммарная энергия на 3–4 порядка превышает сейсмическую энергию от природных землетрясений [Адушкин, 2013]. За годы наблюдений, начиная с 2004 года, накоплен огромный экспериментальный материал о волновых формах карьерных взрывов. Карьеры расположены на различных эпицентральных расстояниях и азимутах от МСГ «Михнево». Естественно, возникает идея использовать эти данные для построения пространственной карты распределения параметра добротности на территории ВЕП.

В [Нестеркина и др., 2018], по данным наблюдений групп волн Pg и Sg вдоль профиля «Карьер «Новогуровский» – МСГ «Михнево», получены значения добротности Q_p порядка 100 и Q_s порядка 300 на базе в 60 км, т.е. для самой верхней части земной коры.

В последние годы в сейсмологической практике, например, [Wang, Shearer, 2019] были разработаны методы оценки параметра добротности по коде волны Lg , позволяющие использовать наблюдения на одиночной станции. Эта волна регистрируется на эпицентральных расстояниях от 150 до 1500 км и распространяется преимущественно в земной коре. Физической основой используемых алгоритмов является предположение о том, что кода волны Lg является совокупностью закритически отраженных S -волн в коровом волноводе [Press, Ewing, 1952]. Это позволяет использовать модель образования рассеянных волн, предложенную в [Sato, 1988], для коды S -волн при создании алгоритмов оценки параметров добротности по коде волн Lg .

Следует отметить, что существующие алгоритмы разработаны для анализа записей землетрясений, которые на территории ВЕП происходят достаточно редко [Землетрясения..., 2021]. Наш интерес к использованию коды волны Lg связан с тем обстоятельством, что при короткозамедленных промышленных взрывах выделение волны S затруднено в силу наложения волн от подрывов последующих ступеней, а волна Lg и ее кода наблюдается практически всегда. Также мы исходим из предположения, что динамические параметры геологической среды определяются свойствами самой среды, а не типом источника.

Первые результаты использования коды волны Lg для оценки параметра добротности на ВЕП были представлены в [Тарасов и др., 2019]. В качестве экспериментальных данных в этом исследовании использованы взрывы, произведенные на карьере «Михайловский», принадлежащий Михайловскому ГОКу, зарегистрированные на центральном приборе МСГ «Михнево». Для оценки параметра добротности был применен метод SSR (*stacked spectral ratio*) [Xie, Nuttli, 1988]. В основе алгоритма лежит расчет отношения спектров в последовательных временных окнах коды волны Lg . В интервале частот 3–6 Гц были получены величины $Q = 584$ при длине коды 100–120 сек, и $Q = 266$ для так называемой «ранней коды» [Раутиан, Халтурин, 1981] длительностью 40–60 сек.

Согласно многочисленным исследованиям, величина добротности может рассматриваться как показатель тектонической активности региона. Так, в [Sato, Fehler, 2012] по значениям Q регионы делятся на высокую сейсмическую активность при $Q < 200$, интервал 200–600 соответствует районам умеренной сейсмической активности и $Q > 600$ – характерно для стабильных платформенных территорий. Согласно данным [Mitchell et al., 1997; 2008; 2015], для территории ВЕП значения добротности, полученные по коде волны Lg на частоте 1 Гц, определены в диапазоне 300–800. Таким образом, приведенные в [Тарасов и др., 2019] результаты могут быть интерпретированы следующим образом: территория центральной части ВЕП относится к районам с умеренной сейсмической активностью или верхняя часть земной коры характеризуется значительной раздробленностью.

Целью предлагаемого исследования является оценка коэффициента затухания (добротности) по данным «прямых» измерений вдоль профиля «Карьер «Михайловский» – МСГ «Михнево»» и оценка возможности применения алгоритмов, разработанных применительно к землетрясениям по данным регистрации карьерных взрывов.

Экспериментальные данные

В качестве экспериментальных данных использовались записи двух массовых взрывов на карьере «Михайловский» Михайловского горно-обогатительного комбината (ГОКа) 29.06.2022 г. Мощность первого взрыва, произведенного в 09:00:03 (GMT), составляла 2823 т; было подорвано последовательно 7 блоков, продолжительность первого взрыва составляла 12 с. Мощность второго, произведенного в 10:00:09 (GMT), составляла 701.5 т и был подорван один блок.

Расположение пунктов наблюдений на сейсмическом профиле (рис. 1) и эпицентральные расстояния от первого и второго взрывов указаны в табл. 1. В результате сбоя в работе регистратора записи событий на пункте наблюдения 3 отсутствуют.

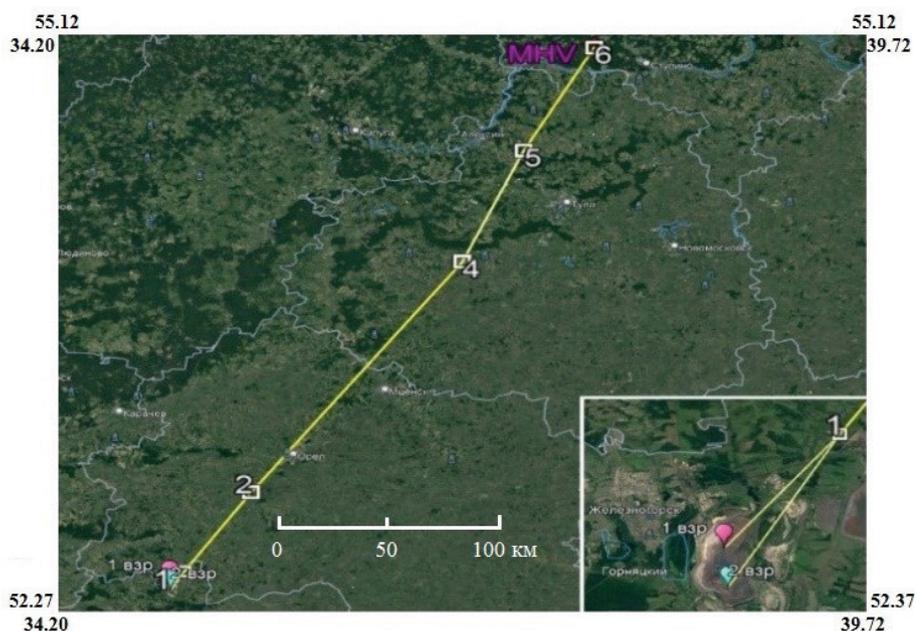


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдения на профиле. На врезке показаны эпицентры 1-го взрыва («Центр»: координаты N 52,3207°, E 35,4236°) и 2-го («Юг»: координаты N 52,2986°, E 35,4292°) на карьере Михайловского ГОКа и расположение ближайшего 1 пункта наблюдения «Волково»

Таблица 1.

Координаты пунктов наблюдения и эпицентральные расстояния относительно центрального прибора МСГ «Михнево»

№ п/п	Координаты		R(1), км	R(2), км
	широта	долгота		
1	52.389	35.498	9	11
2	52.776	35.851	58	60
4	53.542	37.010	172	174
5	54.443	37.353	268	270
6	54.955	37.766	331	333

Пункты наблюдений 2–6 были укомплектованы сейсмостанциями Reftek 130 и трехкомпонентными датчиками СПВ-3К. На пункте 1 наблюдения велись датчиком СМ-3 КВ. Все датчики обеспечивали регистрацию сейсмических сигналов в полосе 0.5–40 Гц.

При анализе записей карьерных взрывов наибольшую трудность представляет выделение вступления волны *S* из-за наложения волн от подрывов последующих блоков. В нашем случае были точно известны координаты и время подрыва первого блока, так же для уточнения времени вступлений продольных и поперечных волн был применен поляризационный анализ (рис. 2).

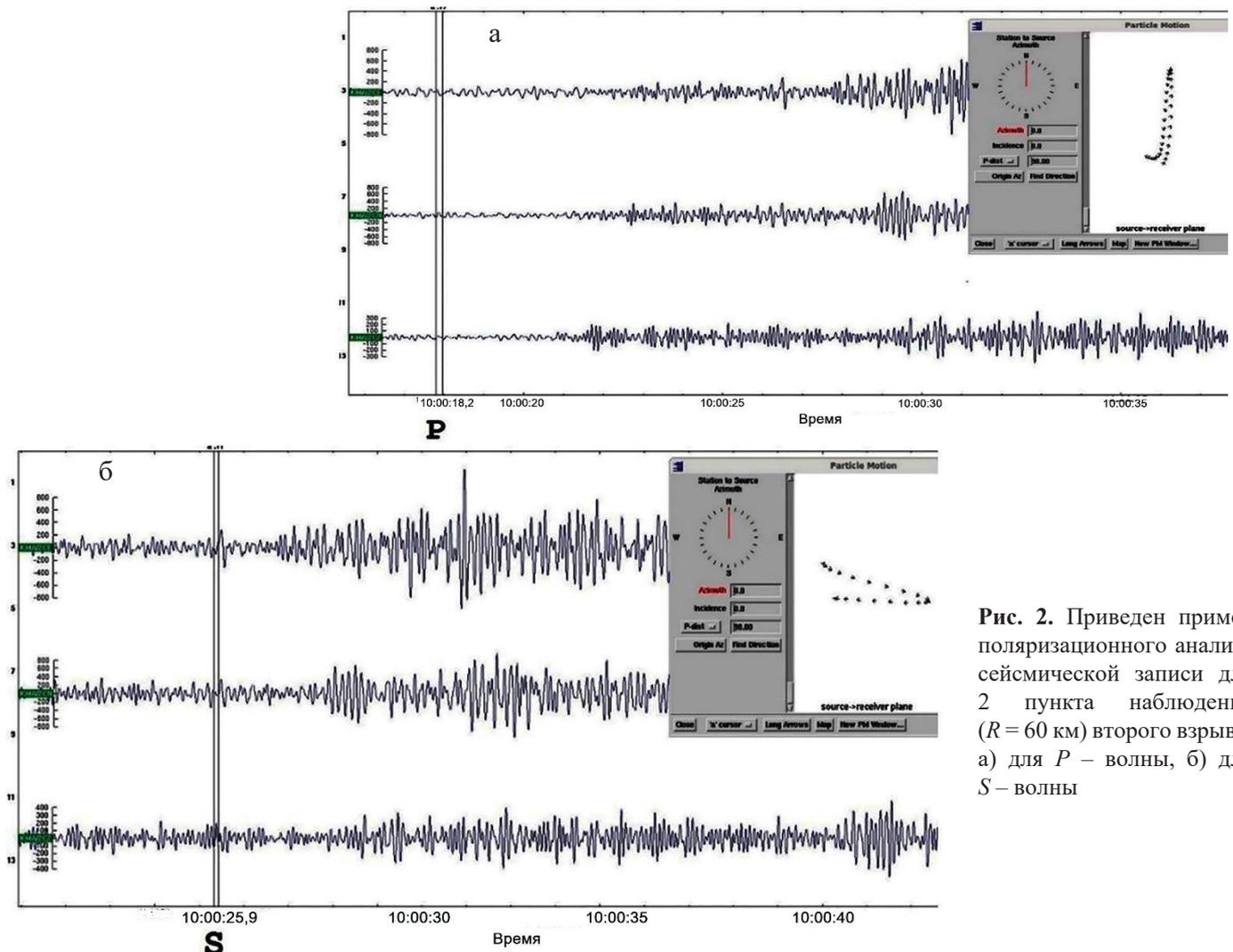


Рис. 2. Приведен пример поляризационного анализа сейсмической записи для 2 пункта наблюдения ($R = 60$ км) второго взрыва: а) для *P* – волны, б) для *S* – волны

На рис. 3 приведены скоростная модель, используемая при локации событий на МСГ «Михнево» [Взрывы..., 2013], и теоретические годографы отраженных и преломленных волн.

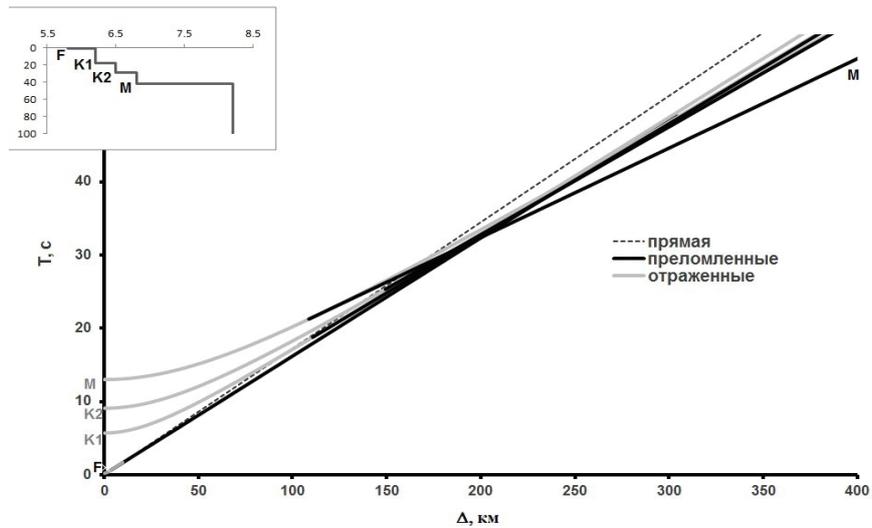
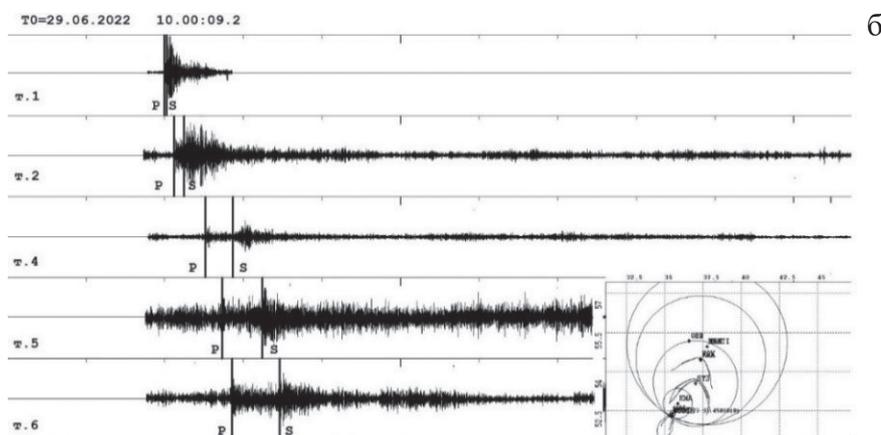
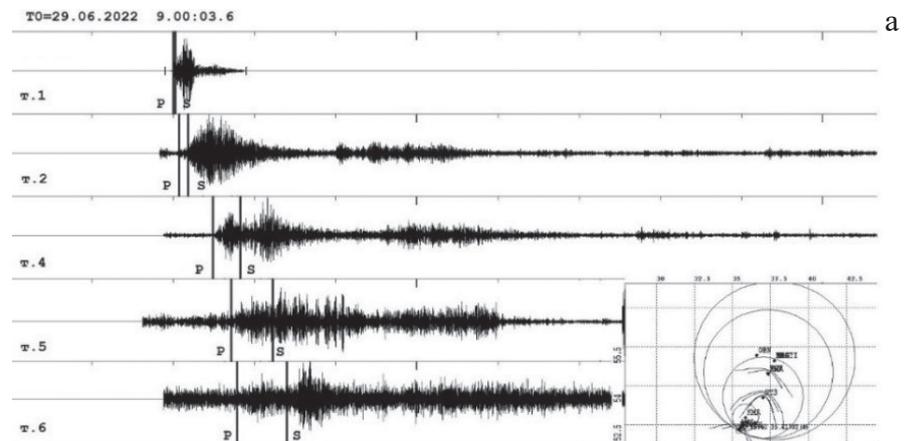


Рис. 3. Скоростная модель и теоретические годографы для P - волн в редуции на 8 км/сек. Серым цветом показаны отраженные волны, черным – преломленные, пунктиром – прямые. F – прямая волна, K1 и K2 – границы в земной коре, M – граница Мохо

На рис. 4 приведены волновые формы по всем пунктам наблюдений для первого взрыва (рис. 4а) и второго (рис. 4б) с указанием выделенных фаз продольных (P) и поперечных (S) волн и локации по программе ELWIN [Asming, 2004].

Рис. 4. Примеры регистрации первого (а) и второго (б) взрывов и время вступлений P - и S - волн. На врезке в правом нижнем углу пример локации по программе ELWIN



Сейсмические записи отфильтрованы в полосе 1–11 Гц фильтром Баттерворда в 4 прогона.

По данным о временах вступлений продольных и поперечных волн для первого и второго взрывов построен объединенный годограф (рис. 5а) и получены оценки кажущихся скоростей P - и S -волн от расстояния (рис. 5б, рис. 5в). Для аппроксимации использовалась линейная функция вида (1):

$$y = (a \pm b) + (c \pm d) \cdot x \quad (2)$$

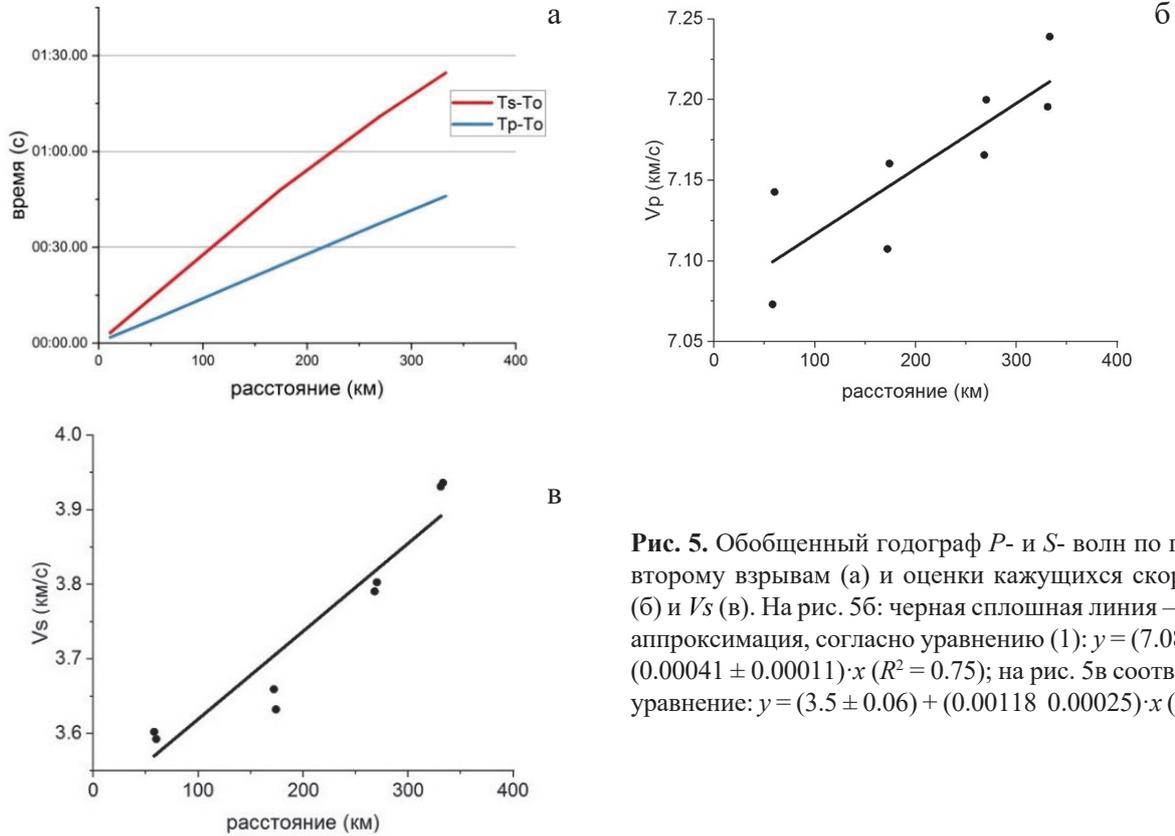


Рис. 5. Обобщенный годограф P - и S - волн по первому и второму взрывам (а) и оценки кажущихся скоростей V_p (б) и V_s (в). На рис. 5б: черная сплошная линия – линейная аппроксимация, согласно уравнению (1): $y = (7.08 \pm 0.02) + (0.00041 \pm 0.00011) \cdot x$ ($R^2 = 0.75$); на рис. 5в соответственно уравнение: $y = (3.5 \pm 0.06) + (0.00118 \pm 0.00025) \cdot x$ ($R^2 = 0.92$).

На рис. 6 приведены графики изменения амплитуды колебаний P - волны (Z -компонента) в зависимости от эпицентрального расстояния для двух взрывов.

Четко прослеживается резкое уменьшение амплитуды колебаний между первой (на расстоянии порядка 10 км) и второй точками наблюдений (на расстоянии около 60 км) от эпицентра взрыва, а также, на фоне общего уменьшения амплитуды с увеличением эпицентрального расстояния, ее возрастание на 5 точке (эпицентрального расстояния порядка 270 км).

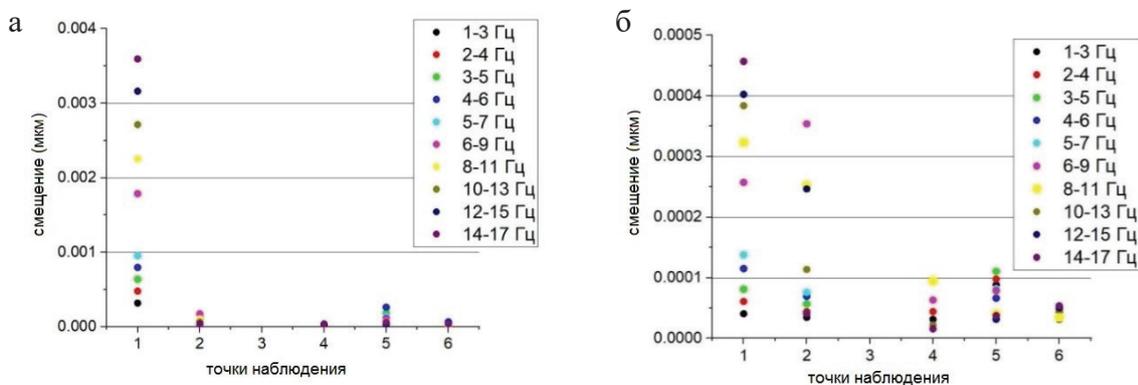


Рис. 6. Изменения амплитуд смещений первых вступлений P - волны (Z -компонента) в различных частотных диапазонах для первого (а) и второго (б) взрывов

Более детально изменение амплитуды колебаний можно рассмотреть на рис. 7, где представлены те же зависимости, исключая точку наблюдений 1.

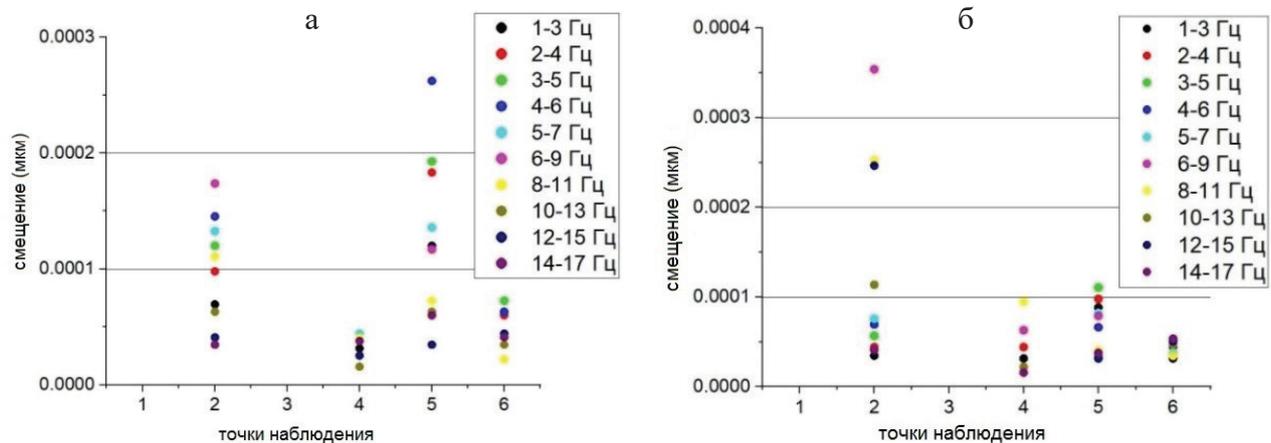


Рис. 7. Амплитуды смещений первых вступлений P - волны (Z -компонента) в различных частотных диапазонах для первого (а) и второго (б) взрывов по всем точкам наблюдения, исключая точку 1

Как уже упоминалось выше, на графиках зависимости амплитуды от эпицентрального расстояния отмечается две особенности: резкое убывание амплитуды в точке 2 по отношению к точке 1 и на фоне общего убывания наблюдается увеличение амплитуды в диапазоне эпицентральных расстояний 200–270 км. Можно предположить, что на расстояниях 10–58 км (точки 1 и 2) сейсмические волны распространяются в верхней части земной коры, которая более раздроблена по отношению к нижележащим слоям и, следовательно, обладает большими рассеивающими и поглощающими свойствами. Также нельзя исключить влияния взрывных работ, производимых в карьере на протяжении нескольких десятков лет, на состояние верхней части разреза. Это предположение требует более глубокого анализа, т.к. наши исследования [Нестеркина и др., 2018] не отметили значимых изменений амплитуды сигнала вдоль профиля: карьер «Новогуровский» – МСГ «Михнево» на этих же эпицентральных расстояниях.

Вторая особенность – возрастание амплитуды на эпицентральных расстояниях порядка 200–270 км. Этот факт может быть объяснен суперпозицией отраженных волн от границ в земной коре и рефрагированной волны на границе Мохо (см. рис. 3).

Вторым возможным объяснением наблюдаемого феномена может являться слой пониженных скоростей в средней коре [Vogman et al., 2012]. В поддержку этой версии говорит тот факт, что кажущаяся скорость на эпицентральных расстояниях в 331 км (эпицентр 1 взрыва на карьере – центр МСГ «Михнево») составляет около 7.1 км/с при традиционных значениях порядка 8 км/с, а также видимое на годографах (рис. 5) уменьшение кажущейся скорости после эпицентрального расстояния в 200 км. На низкие скорости вплоть до подошвы земной коры указывается в работе [Дубянский, Марычев, 2016] для территории Воронежского кристаллического массива.

Наблюдаемые отклонения в поведении амплитуды сейсмических волн могут оказать влияние на величину затухания и требуют дальнейших исследований методами математического моделирования.

Предварительный анализ записей

Для всех точек наблюдений проводится предварительный анализ спектрального состава шума и полезного сигнала. Для оценки отношения сигнал/шум выбирались участки записей до вступления первой волны, рассчитанные относительно времени в эпицентре взрыва для заданного эпицентрального расстояния.

На рис. 8 приведен пример участка записи и указаны интервалы времени, на которых рассчитывался спектр мощности шума и сигнала на точке 2 (1 взрыв, эпицентрального расстояния – 58 км). Был выбран интервал времени 6 сек перед вступлением группы волн P , сигнала – 4 сек, так как увеличение этого интервала может привести к «захвату» первых вступлений группы волн S .

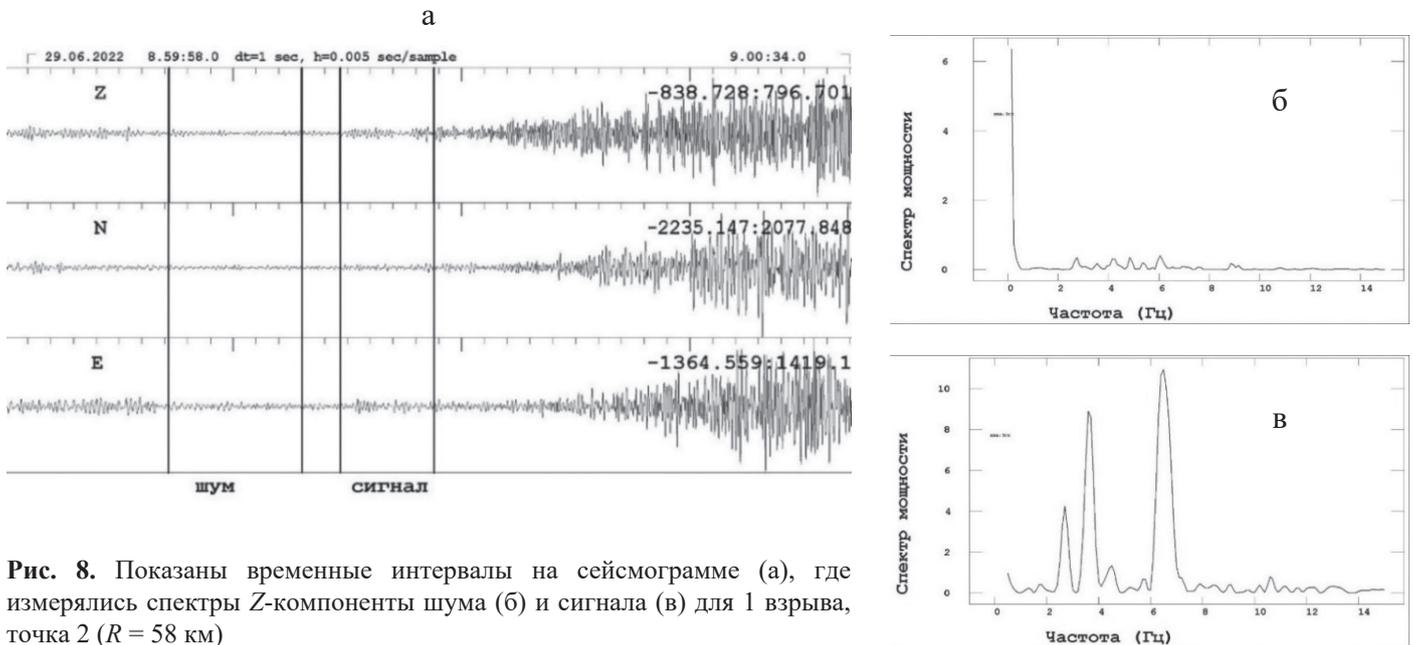


Рис. 8. Показаны временные интервалы на сейсмограмме (а), где измерялись спектры Z -компоненты шума (б) и сигнала (в) для 1 взрыва, точка 2 ($R = 58$ км)

Видно, что исследуемый сигнал находится в полосе 2–8 Гц, его уровень, как минимум, в 4 раза превышает уровень шума. Изрезанность графика на рис. 8в связана с приходом волны P , инициируемой подрывами последующих блоков. Эта характеристика сигнала исчезает на больших эпицентральных расстояниях, когда мы видим единый цуг P -волны. В целом проведенный анализ показал, что в полосе частот 2–8 Гц амплитуда сигнала для всех точек наблюдений превосходит уровень шума не менее чем в 2 раза.

Методика обработки

Для анализа экспериментальных данных были применены два подхода. Первый метод описан в [Берзон и др., 1962]. Основным параметром, определяемым в эксперименте, является так называемый амплитудный коэффициент затухания – $\alpha(f)$, который может быть получен из следующего выражения:

$$A(r) = A_0 r^{-n} e^{-\alpha(f)r}, \quad (3)$$

где A_0 – амплитуда волны в источнике, r – расстояние, пройденное волной, $A(r)$ – амплитуда волны на расстоянии r от источника, n – показатель геометрического расхождения, α – коэффициент затухания.

Показатель геометрического расхождения зависит от типа волны и варьируется в пределах от 0.5 до 2. Как правило принимается $n = 1$ для поверхностных волн и $n = 2$ для объемных волн. Однако экспериментальные наблюдения затухания волн в различных геологических условиях показали, что значения показателя $n = 1$ применимо для различных эпицентральных расстояний и приемлемо для объемных волн.

Второй метод, который был применен в данном исследовании для определения затухания и соответственно добротности, основан на изменении с расстоянием отношения амплитуд $A(f_i)/A(f_k)$ спектральных составляющих, соответствующих разным частотам f_k и f_i . Этот метод был предложен Ю. И. Васильевым для обработки профильных наблюдений и подробно описан в [Берзон и др., 1962]. Данный подход широко использовался при интерпретации наблюдений вдоль профилей ГСЗ

[Сумерина, 1977; Егоркин и др., 1981]. Преимуществом рассматриваемого метода является отсутствие необходимости оценивать или задавать величину геометрического расхождения. Условием применимости является предположение, что на используемых эпицентральных расстояниях тип и форма волны не изменяется. В данном исследовании мы предполагаем, что используются рефрагированные продольные и поперечные волны, распространяющиеся в средней части земной коры.

Результаты

Обработка в *первом методе* заключалась в измерении значения амплитуды в различных частотных диапазонах для каждой точки наблюдения и расчета коэффициента затухания по формуле (2), где A_0 – амплитуда волны на первой точке профиля. При этом использовалось значение максимальной амплитуды в заданном частотном окне. Эти расчеты были выполнены для двух взрывов по трем компонентам записей на каждой точке наблюдений. Средние значения коэффициента затухания затем использовались для построения графика зависимости α от частоты, который потом аппроксимировался прямой линией. Угол наклона полученных прямых давал оценку эффективного коэффициента затухания K (значения c в уравнении 1) в зависимости от частоты. В качестве примера на рис. 9 приведены зависимости расчетных значений α от частоты для первого взрыва.

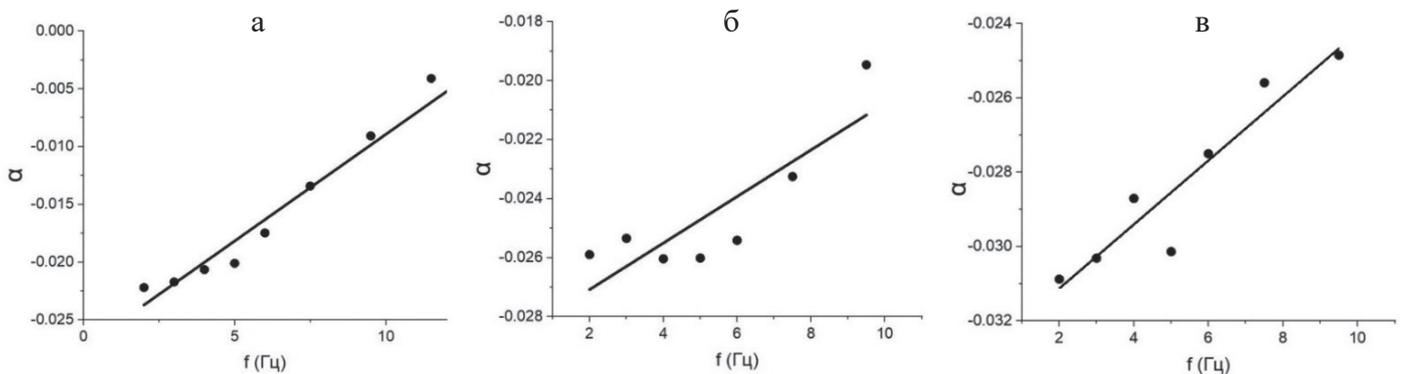


Рис. 9. Расчетные значения $\alpha(f)$ км⁻¹ для первого взрыва: а) Z-компонента, б) N-компонента, в) E-компонента

В результате были получены следующие значения эффективного коэффициента затухания K с учетом погрешности определения для первого и второго взрывов по каждой компоненте (табл. 2). Величина добротности Q рассчитывалась по формуле:

$$Q = \pi/KV, \quad (4)$$

где V – кажущаяся скорость V_p или V_s – в зависимости от того, по какой компоненте оценивалась величина добротности.

Таблица 2.

Значения эффективного коэффициента затухания K и соответствующие величины добротности Q при кажущихся скоростях $V_p = 7.1$ км/с и $V_s = 3.5$ км/с по первому и второму взрывам

Взрыв	K_p	Q_p	K_{SN}	Q_{SN}	K_{SE}	Q_{SE}
1	0.00166 ± 0.00013	263	0.00081 ± 0.00021	1077	0.00062 ± 0.00014	1402
2	0.0011 ± 0.00022	396	0.00103 ± 0.00009	846	0.00115 ± 0.00014	758

Таким образом, применение этого подхода показало непротиворечивые результаты по данным регистрации двух взрывов для P- волн. Первый взрыв был короткозамедленным с последовательным

подрывом семи блоков, как было отмечено выше, а во втором подрывался один блок, т.е. отсутствовало наложение сейсмических волн от подрывов следующих блоков, что может быть причиной расхождения значений Q для S - волн.

Обработка результатов наблюдений по второму методу состояла в следующем. По амплитудным спектрам первых вступлений волн P и S строились графики зависимости $A(f_i)/A(f_k)$ от эпицентрального расстояния, где $A(f_i)$ – амплитуда волн P и S в диапазонах частот: 1–3, 2–4, 3–5, 4–6, 5–7, 6–9 Гц, а $A(f_k)$ – амплитуда некоторой фиксированной частоты, в нашем случае 8–9.5 Гц. Абсолютные значения коэффициентов затухания и их зависимости от частоты находились в предположении, что $\alpha = 0$ при $f = 0$, а зависимость $\alpha(f)$ – линейна в исследуемом диапазоне частот (1–9.5 Гц).

В качестве примера на рис. 10 приведены графики отношения спектральных амплитуд P - волны первого взрыва от расстояния в разных частотных диапазонах к выбранному (8–9.5 Гц).

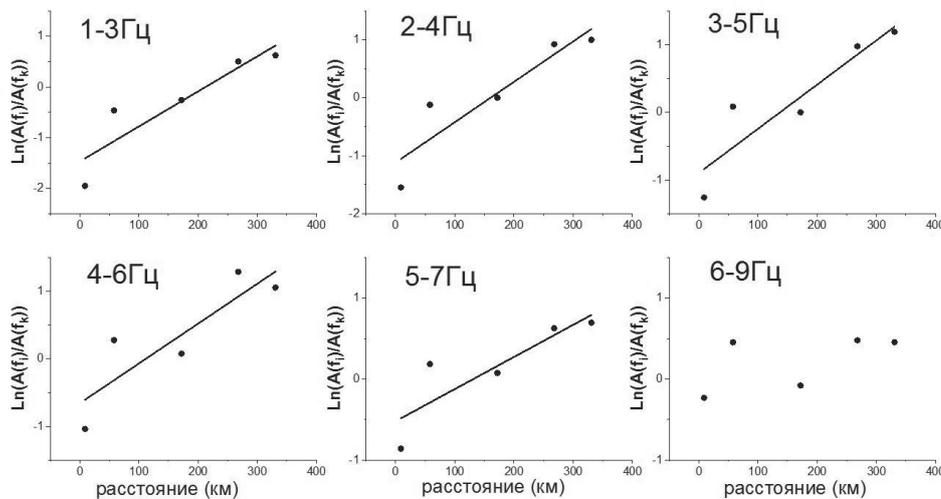


Рис. 10. Графики зависимости отношения спектральных амплитуд P -волны (Z -компоненты) первого взрыва от расстояния в разных частотных диапазонах. Линейная аппроксимация показана на графиках сплошной черной линией. По вертикальной оси отложены натуральные логарифмы (Ln) отношений амплитуд

Условием аппроксимации полученных значений логарифма отношений амплитуд от эпицентрального расстояния является предположение, что коэффициент детерминации $R^2 > 0.75$. Для частотного диапазона 6–9 Гц это условие не выполняется, поэтому при дальнейших расчетах значения в данном частотном диапазоне не использовались. Графики зависимостей отношений спектральных амплитуд волны P - (Z -компонента) для второго взрыва, а также аналогичные графики для первого и второго взрывов волн S - (E - и N - компоненты), имеют достаточно похожий вид.

Полученные зависимости были аппроксимированы линейной функцией и описываются уравнением (1). Уравнения линейной аппроксимации по каждой из компонент приведены в таблицах 3–5.

Таблица 3.

Линейная аппроксимация отношений спектральных амплитуд в разных частотных диапазонах для P -волны на Z -компоненте для первого и второго взрывов

Диапазон ч-т, Гц	Уравнения линейной аппроксимации	
	1 взрыв	2 взрыв
1–3	$y = (-1.47 \pm 0.37) + (0.00891 \pm 0.0018) \cdot x$	$y = (-2.26 \pm 0.46) + (0.00815 \pm 0.00223) \cdot x$
2–4	$y = (-1.12 \pm 0.36) + (0.00696 \pm 0.00174) \cdot x$	$y = (-1.92 \pm 0.39) + (0.00782 \pm 0.00191) \cdot x$
3–5	$y = (-0.89 \pm 0.34) + (0.00654 \pm 0.00166) \cdot x$	$y = (-1.59 \pm 0.38) + (0.00718 \pm 0.00188) \cdot x$
4–6	$y = (-0.65 \pm 0.39) + (0.00589 \pm 0.00191) \cdot x$	$y = (-1.26 \pm 0.27) + (0.00495 \pm 0.00133) \cdot x$
5–7	$y = (-0.51 \pm 0.27) + (0.00396 \pm 0.00132) \cdot x$	$y = (-1.12 \pm 0.34) + (0.00472 \pm 0.00166) \cdot x$

Таблица 4.

Линейная аппроксимация отношений спектральных амплитуд в разных частотных диапазонах для S-волны на E-компоненте для первого и второго взрывов

Диапазон ч-т, Гц	Уравнения линейной аппроксимации:	
	1 взрыв	2 взрыв
1–3	$y = (-1.69 \pm 0.38) + (0.00641 \pm 0.00184) \cdot x$	$y = (-1.69 \pm 0.34) + (0.006 \pm 0.00166) \cdot x$
2–4	$y = (-1.26 \pm 0.39) + (0.00564 \pm 0.00193) \cdot x$	$y = (-1.46 \pm 0.32) + (0.0058 \pm 0.00158) \cdot x$
3–5	$y = (-1.01 \pm 0.38) + (0.00461 \pm 0.00184) \cdot x$	$y = (-1.16 \pm 0.23) + (0.00454 \pm 0.00115) \cdot x$
4–6	$y = (-1.04 \pm 0.28) + (0.00479 \pm 0.00139) \cdot x$	$y = (-1.03 \pm 0.11) + (0.00369 \pm 0.00054) \cdot x$
5–7	$y = (-0.71 \pm 0.21) + (0.00311 \pm 0.00105) \cdot x$	$y = (-0.91 \pm 0.11) + (0.00242 \pm 0.00051) \cdot x$

Таблица 5.

Линейная аппроксимация отношений спектральных амплитуд в разных частотных диапазонах для S-волны на N-компоненте для первого и второго взрывов

Диапазон ч-т, Гц	Уравнения линейной аппроксимации	
	1 взрыв	2 взрыв
1–3	$y = (-2.13 \pm 0.25) + (0.00874 \pm 0.00122) \cdot x$	$y = (-1.76 \pm 0.43) + (0.00653 \pm 0.00212) \cdot x$
2–4	$y = (-1.72 \pm 0.29) + (0.00829 \pm 0.00141) \cdot x$	$y = (-1.42 \pm 0.38) + (0.0062 \pm 0.00185) \cdot x$
3–5	$y = (-1.23 \pm 0.24) + (0.00647 \pm 0.0012) \cdot x$	$y = (-1.17 \pm 0.29) + (0.00553 \pm 0.00141) \cdot x$
4–6	$y = (-0.84 \pm 0.30) + (0.00446 \pm 0.00147) \cdot x$	$y = (-0.92 \pm 0.25) + (0.0045 \pm 0.00122) \cdot x$
5–7	$y = (-0.64 \pm 0.22) + (0.00348 \pm 0.0011) \cdot x$	$y = (-0.79 \pm 0.11) + (0.00326 \pm 0.00051) \cdot x$

Далее строились графики зависимости рассчитанных значений наклона аппроксимирующих прямых от частоты (параметр c в уравнении 1).

На рис. 11 приведен пример расчета абсолютного значения коэффициента α . При этом, предполагается, что коэффициент поглощения равен 0 при частоте, равной 0.

Были проведены расчеты параметра добротности Q по формуле (4), где K – коэффициент наклона графика, приведенного на рис. 11. Данные аппроксимируются уравнением: $y = 0.0011(\pm 0.00016) \cdot x$;

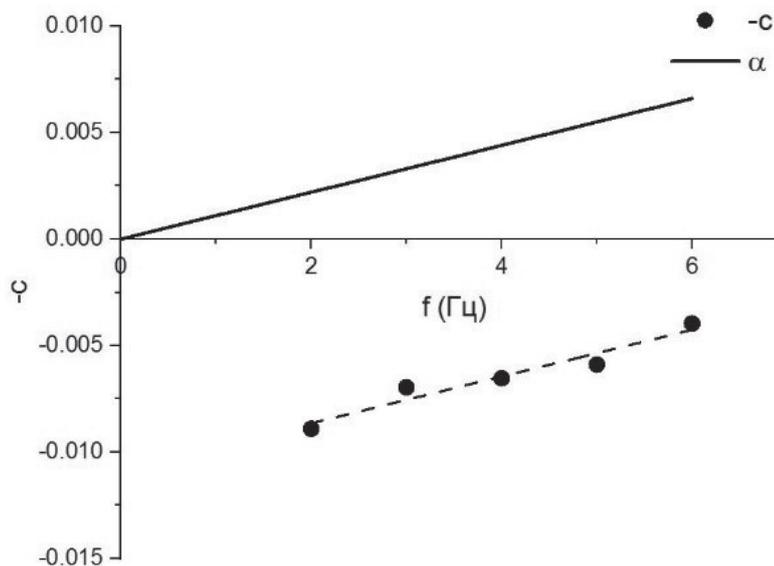


Рис. 11. Зависимость коэффициента затухания α от частоты для P-волны (Z-компонента) для первого взрыва; c – коэффициент наклона аппроксимирующей прямой согласно уравнению (1)

$Q_p = 396$. Аналогичным образом были определены параметры добротности для волны P - (Z -компонента) для второго взрыва, а также для первого и второго взрывов волн S - (E - и N - компоненты). Результаты представлены в табл. 6.

Таблица 6.

Значения коэффициента наклона K графиков и соответствующие величины добротности Q для первого и второго взрывов

Взрыв	K_p	Q_p	K_{SN}	Q_{SN}	K_{SE}	Q_{SE}
1	0.0011 ± 0.00016	396	0.00144 ± 0.00015	606	0.000745 ± 0.00014	1171
2	0.00097 ± 0.00012	448	0.00082 ± 0.00011	1058	0.00093 ± 0.0001	941

Обсуждение и выводы

Особенность исследований параметра добротности на территории центральной части ВЕП состоит в том, что практически единственным источником сейсмических волн являются промышленные взрывы на карьерах, при этом, в основном, короткозамедленные. Этот факт делает структуру волнового поля достаточно сложной из-за наложения вступлений сейсмических волн, инициированных подрывами последующих ступеней заряда. В данном исследовании были использованы наблюдения «исключительного случая», когда с интервалом в один час был произведен один взрыв по стандартной технологии: серия последовательных короткозамедленных взрывов на семи блоках и второй – подрыв одного блока. Это позволило нам исследовать эффект суперпозиции волн от подрывов последующих блоков на результат оценки параметра добротности.

Мы использовали два подхода, которые были разработаны в середине прошлого века для интерпретации данных профильных наблюдений при ГСЗ и показали свою эффективность. Применение этих методов также обусловлено сходством инициирования сейсмического излучения в ГСЗ и в нашем случае – взрывов. Полученные значения параметра добротности для трех компонент сейсмических записей приведены в табл. 7.

Таблица 7.

Параметры добротности, полученные в результате исследования трех компонент сейсмических записей двумя методами

Q	Метод первый		Метод второй	
	взрыв 1	взрыв 2	взрыв 1	взрыв 2
Q_p	263	396	396	448
Q_{SE}	1402	758	1171	941
Q_{SN}	1077	846	606	1058

Достаточно стабильные значения получены по двум методикам для P - волн. Значения для S -волн имеют значительный разброс. Различие в значениях может быть связано с тем, что при расчетах по первой методике коэффициент геометрического расхождения был принят равным 1, что может быть не совсем верным, а также тем, что для первого взрыва мы не можем исключить наложения на S - волну волн от подрывов последующих блоков.

Наиболее константные результаты получены по данным второго взрыва (по двум методикам), что определяется его «простотой» – подрыв одного блока составляет порядка 400 для P - волн и порядка 900 для S - волн, что выше оценок, полученных в [Егоркин и др., 1981]. Объяснить это расхождение можно тем, что значения кажущейся скорости, используемой для расчета добротности, составляли 8.0 км/с, а не 7.1 км/с как в нашем случае, а также различием в геологическом строении районов

исследования. Профиль Воркута – Кострома [Егоркин и др., 1981] частично проходил в районе Солигаличского авлакогена [Адушкин и др., 2019], относящегося к потенциально сейсмогенным структурам севера ВЕП, и, как следствие, характеризующийся пониженным значением добротности. Величина добротности, полученная в [Тарасов и др., 2019] по коде волны Lg от карьерных взрывов для этой же трассы «Карьер «Михайловский» – «Михнево»», составляет порядка 600 в интервале частот 3–4 Гц, что ниже наших значений для S - волн в частотном диапазоне 1–6 Гц. Значения параметра добротности, приведенные в [Дубянский, Марычев, 2016] для Воронежского кристаллического массива, превышают наши примерно в полтора раза и получены на частоте около 10 Гц, что, возможно, и объясняет наблюдаемые различия, но, если рассматривать Воронежский кристаллический массив как относительно сейсмически активный регион на ВЕП, то согласно общемировым данным [Sato et al., 2012], величина добротности для этой территории должна быть значительно ниже.

Мы понимаем, что сделанные оценки величины добротности по двум взрывам при достаточно редком размещении точек на профиле не могут рассматриваться как окончательная оценка этой величины. Тем не менее, при практически полном отсутствии данных о значениях добротности на территории ВЕП, полученный нами результат важен для понимания возможности использования данных о карьерных взрывах для детального изучения этого параметра и может служить неким ориентиром в ходе анализа вновь полученных оценок. Следующий важный вывод – это выбор методов и алгоритмов. По нашему мнению, возможно применение метода спектральной инверсии [Sychev, 2017] к данным об амплитудах первых вступлений P - волн как более свободных от наложения вторичных фаз от подрывов следующих ступеней, а также амплитуд первых вступлений S - волн в коротком временном окне – около 1–1.5 сек. Использование коды волн S и Lg , по всей вероятности, возможно, но требует более детального анализа выбора ее начала и длины, учитывающие скоростное строение индивидуальной трассы.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (темы №№ 122040400015-5, 122032900172-5).

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность ведущему научному сотруднику ИДГ РАН, кандидату физ.-мат. наук В. И. Куликову за консультации и ценные замечания, сделанные в ходе написания статьи.

Список литературы

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы / Пер. с англ. М. : Мир, 1983. Т. 1. – 520 с.
- Адушкин В.В. Сейсмичность взрывных работ на территории Европейской части России // Физика Земли. 2013. № 2. С. 110–130.
- Адушкин В.В., Санина И.А., Иванченко Г.Н. и др. Сейсмогенные древние структуры центра и севера Восточно-Европейской платформы // Доклады Академии наук. 2019. Т. 489. № 4. С. 405–408. DOI: 10.31857/S0869-56524894405-408.
- Антикаева О.И. Некоторые результаты изучения поля поглощения S -волн на Кавказе методом короткопериодной коды // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 3. С. 104–125.
- Берзон И.С., Епинаньева А.М., Парийская Г.Н., Стародубовская С.П. Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. Москва: Изд-во АН СССР. 1962. С. 507.
- Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / Под ред. В. В. Адушкина и А. А. Маловичко. М. : ГЕОС, 2013. С. 287–342.
- 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.

Дубянский А.И., Марычев Е.В. Оценка добротности земной коры Воронежского кристаллического массива по записям коды волн от промышленных взрывов: материалы 43-ой сессии Международного научного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей» (26–30 января 2016, Воронеж). Воронеж, 2016. С. 75–78.

Егоркин А.В., Кун В.В., Чернышев Н.М. Поглощение продольных и поперечных волн в коре и верхней мантии Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы // Физика Земли. 1981. № 2. С. 37–50.

Землетрясения России в 2019 году: Ежегодник. Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2021. С. 214.

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.

Нестеркина М.А., Куликов В.И., Константиновская Н.Л., Санина И.А., Ризниченко О.Ю. Оценка уровня сейсмического воздействия промышленных взрывов в Центральной части Восточно-Европейской платформы // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 2. С. 49–65.

Раутиан Т.Г., Халтурин В.И. и др. Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука. 1981. С. 136.

Санина И.А., Ризниченко О.Ю., Волосов С.Г., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л. Уникальной научной установке «Михнево» ИДГ РАН – 15 // Динамические процессы в геосферах: сб. научн тр. ИДГ РАН. М.: Графитекс, 2019. № 11. С. 48–56. DOI: 10.26006/IDG.2019.11.38623.

Санина И.А., Константиновская Н.Л. Особенности идентификации карьерных взрывов в центральной части Восточно-Европейской платформы по данным малоапертурной группы «Михнево» // Российский сейсмологический журнал. 2022. Т. 4. № 2. С. 23–32.

Сумерина Э.П. К вопросу о поглощении продольных и поперечных волн. В кн. Состояние и перспективы развития методов поперечных и обменных волн в сейсморазведке. М.: Ротапринт ВНИИГеофизика. 1977. С. 27.

Тарасов С.А., Ризниченко О.Ю., Санина И.А., Варыпаев А.В., Воронин Г.О. Добротность центральной части ВЕП, определенная по коде волны Lg по данным МСГ «Михнево» // Российский сейсмологический журнал. 2019. Т. 1. № 1. С. 57–66.

Aki K. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves // J. Geophys. Res. 1969. Vol. 74. P. 615–631.

Aki K., Chouet B. Origin of the coda waves: source, attenuation and scattering effects // J. Geophys. Res. 1975. Vol. 80. P. 3322–3342.

Asming V.E. Programming complex for automatization of detection, location and interpretation of the seismic events and its application for the study of the seismicity of the North-Western region: Dr. phys. and math. sci. diss. Moscow, Russia, 2004. P. 272.

Bormann P., Dewey J.W. The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes. March, 2012. P. 1–44. DOI: 10.2312/GFZ. NMSOP-2 IS 3.3.

Egorikin A.V., Kun V.V. P-wave attenuation in the upper mantle of the Earth // Izv. Phys. Solid Earth. 1978. Vol. 4. P. 25–36.

Mitchell B.J., Pan Y., Xie J., Cong L. Lg coda Q variation across Eurasia and its relation to evolution // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. P. 22767–22779.

Mitchell B.J., Cong L., Ekström G. A continent-wide map of 1 Hz Lg coda Q across Eurasia and its relation to lithospheric evolution // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. No. B04303.

Mitchell B., Cong J.L., Jemberie A.L. Continent-wide maps of Lg coda Q for North America and their relationship to crustal structure and evolution // Bull. Seismol. Soc. Am. 2015. Vol. 105. P. 409–419.

Press F., Ewing M. Two slow surface waves across North America // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1952. Vol. 42. P. 219–228.

Sanborn C.J., Cormier V.F., Fitzpatrick M. Combined effects of deterministic and statistical structure on high-frequency regional seismograms // Geophys. J. Int. 2017. Vol. 210(2). P. 1143–1159.

Sato H. Energy propagation including scattering effect // J. Phys. Earth. 1977. Vol. 25. P. 27–41.

Sato H. Fractal interpretation of the linear relation between logarithms of maximum amplitude and hypocentral distance // Geophys. Res. Lett. 1988. Vol. 15. P. 373–375.

Sato H., Fehler M.C., Maeda T. Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous Earth: Second Ed. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 2012. P. 49.

Sychev I., Koulakov I., El Khrepy S., Al-Arifi N. Pathways of volatile migration in the crust beneath Harrat Lunayyir (Saudi Arabia) during the unrest in 2009 revealed by attenuation tomography // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2017. Vol. 330. P. 1–13.

Wang W., Shearer P.M. An improved method to determine coda-Q, earthquake magnitude, and site amplification: Theory and application to southern California // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2019. Vol. 124. P. 578–598.

Xie J., Nuttli O.W. Interpretation of high-frequency coda at large distances: Stochastic modeling and method of inversion // *Geophys. J.* 1988. Vol. 95. P. 579–595.

Q-FACTOR PARAMETER ESTIMATION ON THE BASE OF OBSERVATION DATA ALONG THE PROFILE «MIKHAILOVSKY QUARRY» – SAA «MIKHNEVO»»

© 2023 I. A. Sanina¹, N. L. Konstantinovskaya^{1,*}, O. V. Ovchinnikova¹, O. A. Usoltseva¹, S. G. Volosov¹, A. G. Goev¹, S. A. Tarasov¹, N. A. Yudochkin¹, Z. Z. Sharafiev¹

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail:konstnat@list.ru*

The estimates of the Q -factor parameter based on the registration of the amplitudes of P - and S - waves along the profile of the «Mikhailovsky» quarry – «Mikhnevo» SAA from two quarry blasts were obtained. The registration was carried out by three-component sensors, which made it possible to estimate the Q values by three components. Two methods were used – the estimation of the amplitude attenuation coefficient and the ratio of the amplitudes of the spectral components depending on the distance. These two approaches were widely used earlier for the interpretation of the deep seismic sounding (DSS) data. As a result, the average values of the Q -factor parameter were obtained by two methods – Q_{ev} for P -waves is about 376 and for S -waves: $Q_{SE} = 1068$ and $Q_{SN} = 897$.

Keywords: quality factor, attenuation, MSG «Mikhnevo», quarry blasts, amplitudes of P - and S - seismic waves.