

УДК 550.34.06

Добротность центральной части ВЕП, определенная по коде волны *Lg* по данным МСГ «Михнево»

© 2019 г. С.А. Тарасов, О.Ю. Ризниченко, И.А. Санина, А.В. Варыпаев, Г.О. Воронин

ИДГ РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. На малоапертурной группе «Михнево» в Московской области с 2004 г. накоплен обширный материал по регистрации крупных промышленных взрывов в карьерах на расстояниях 300–400 км, записи которых обладают относительной стабильностью волновых форм и содержат интенсивные фазы волны *Lg*. Серия записей взрывов на карьере Михайловский использована для определения параметров добротности по коде волны *Lg* по методу SSR [Xie, Nuttli, 1988]. Добротность представлена степенной зависимостью $Q(f)=Q_0f^\eta$, где Q_0 – добротность на частоте 1 Гц и η – показатель степени. Исследована зависимость величины добротности от длительности коды, уровня сейсмического шума, частотного диапазона. В диапазоне 3–6 Гц получены средние значения $Q_0=584\pm 89$; $\eta=0.41\pm 0.06$, более характерные для районов умеренной тектонической активности.

Ключевые слова: добротность, кода *Lg*, промышленные взрывы, Восточно-Европейская платформа, метод SSR.

Для цитирования: Тарасов С.А., Ризниченко О.Ю., Санина И.А., Варыпаев А.В., Воронин Г.О. Добротность центральной части ВЕП, определённая по коде волны *Lg* по данным МСГ «Михнево» // Российский сейсмологический журнал. – 2019. – Т. 1, № 1. – С. 57–66. doi: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2019.1.05>

Введение

Волна *Lg*, регистрируемая на региональных расстояниях, является наиболее мощной высокочастотной фазой на всех трёх компонентах записи и может играть существенную роль при сейсмическом воздействии на здания и сооружения. Эта фаза уверенно регистрируется на расстояниях от 150 км до нескольких сот километров (до 1500 км) при очень слабом проникании энергии из земной коры в мантию. Волна *Lg* моделируется волноводным распространением высших мод поверхностных волн в слое земной коры, характер её распространения существенно зависит от толщины слоя и его структуры [Herrmann, Kijko, 1983]. Другие авторы предлагают моделировать коду волны *Lg* как совокупность закритически отражённых *S*-волн в коровом волноводе [Press, Ewing, 1952]. Последний подход позволяет использовать модели формирования рассеянных волн, разработанные Аки и другими авторами для коды объёмных *S*-волн [Aki, 1969; Aki, Chouet, 1975; Sato, 1977, 1988], для построения алгоритмов расчёта параметров затухания по коде волны *Lg*.

Xie и Nuttli [Xie, Nuttli, 1988] предложили метод определения добротности по коде волны *Lg* по данным одной сейсмограммы, исключая влияние источника и условий точки наблюдения. Алгоритм SSR (stacked-spectral-ratio) основан на расчёте отношения спектров в последовательных временных окнах коды волны *Lg*.

Традиционно добротность представлена степенной зависимостью $Q(f)=Q_0f^\eta$, где Q_0 – добротность на частоте 1 Гц и η – показатель степени. Наибольшая сложность при сопоставлении величины добротности и её частотной зависимости в различных регионах связана с разнообразием параметров, используемых авторами при обработке данных. Как и в случае анализа коды близких землетрясений в различных районах, отсутствует стандартный подход к выбору таких параметров, как групповая скорость для выбора момента начала коды, длительность коды, частотный диапазон фильтрации, частотный диапазон определения добротности. Необходимость чёткой стандартизации при оценке характеристик затухания по коде *S*-волн подчёркивается в [Havskov et al., 2016]. Особое

значение унификация параметров приобретает при попытке построения пространственного распределения параметров Q_0 и η различными томографическими алгоритмами. Первые шаги в этом направлении были предприняты и в отношении расчёта параметров коды волны Lg методом SSR [Mitchell et al., 2015].

В центральной части ВЕП систематические исследования параметров затухания сейсмических волн на региональных расстояниях не проводились из-за отсутствия плотной сети сейсмических станций и малого числа регистрируемых региональных землетрясений. Сказывалось также отсутствие интереса к подобным работам из-за низкого уровня естественной сейсмической активности на ВЕП. В связи с установкой в 2004 г. малоапертурной сейсмической группы «Михнево» в Московской области появилась возможность непрерывной регистрации и идентификации событий различной природы на региональных расстояниях, большинство из которых составляют промышленные взрывы [Адушкин, 2013; *Взрывы и землетрясения...*, 2013]. В настоящей работе рассмотрена возможность использования методов оценки параметров затухания сейсмических волн, разработанных в сейсмологической практике, применительно к источникам другого типа, а именно, мощным карьерным взрывам. Рассмотрена серия взрывов на карьере «Михайловский» ($R=330$ км), записи которых обладают относительной стабильностью волновых форм и содержат интенсивные фазы волны Lg . Кода волны Lg использована для определения параметров добротности по методу SSR [Xie, Nuttli, 1988; Mitchell, 1995]. Определены оптимальные параметры для массовой обработки данных. Исследована зависимость величины добротности от длительности коды, уровня сейсмического шума, частотного диапазона. Полученные значения сопоставлены с мировыми данными, полученными по этому методу в различных регионах Евразии [Mitchell et al., 1997, 2008].

Характеристика данных

Использованы вертикальные компоненты широкополосных и короткопериодных датчиков МСГ «Михнево». В полной конфигурации группа включает 12 пунктов наблюдения с десятью вертикальными и двумя трёхкомпонентными пунктами наблюдения, оснащёнными сейсмическими датчиками СМ-3КВ с полосой пропускания 0.5–40 Гц [Санина и др., 2008, 2009]. Широкополосная трёхкомпонентная автономная цифровая сейсмическая станция АЦСС-3

включает трёхканальный сейсмический регистратор ССД-3Б и сейсмоприёмники STS-2, расположенные в шахте на глубине 20 м. Станция АЦСС-3 обеспечивает регистрацию сейсмических сигналов в полосе частот 0.01–20 Гц с частотой опроса на канал 100 Гц и чувствительностью 0.3 нм/с/отс [Башилов и др., 2013]. Частота дискретизации короткопериодных датчиков составляет 200 Гц. Визуализация записей и предварительная обработка данных осуществляется программой ELWIN [Асминг, 2004].

МСГ «Михнево» регистрирует в год более 700 промышленных взрывов различной мощности [Асминг и др., 2009; Алёшина и др., 2009, 2017]. Большинство из них имеет сложную интерференционную структуру, что затрудняет применение разработанных в сейсмологии методов оценки параметров затухания, основанных на анализе классической формы сейсмограммы землетрясений. Однако избранные записи взрывов на карьере «Михайловский» на расстоянии 330 км в южном направлении от МСГ «Михнево» демонстрируют относительную стабильность волновых форм. За 2006, 2007 и 2015 гг. были отобраны 14 повторяющихся волновых форм взрывов (табл. 1). На рис. 1а представлены записи взрывов, зарегистрированных в 2007 году. Ноль на временной шкале соответствует времени в очаге, определённого операторами по временам вступления P - и S -волн. Магнитуда взрывов варьирует в пределах 2.8–3.2 ML .

Основы метода SSR

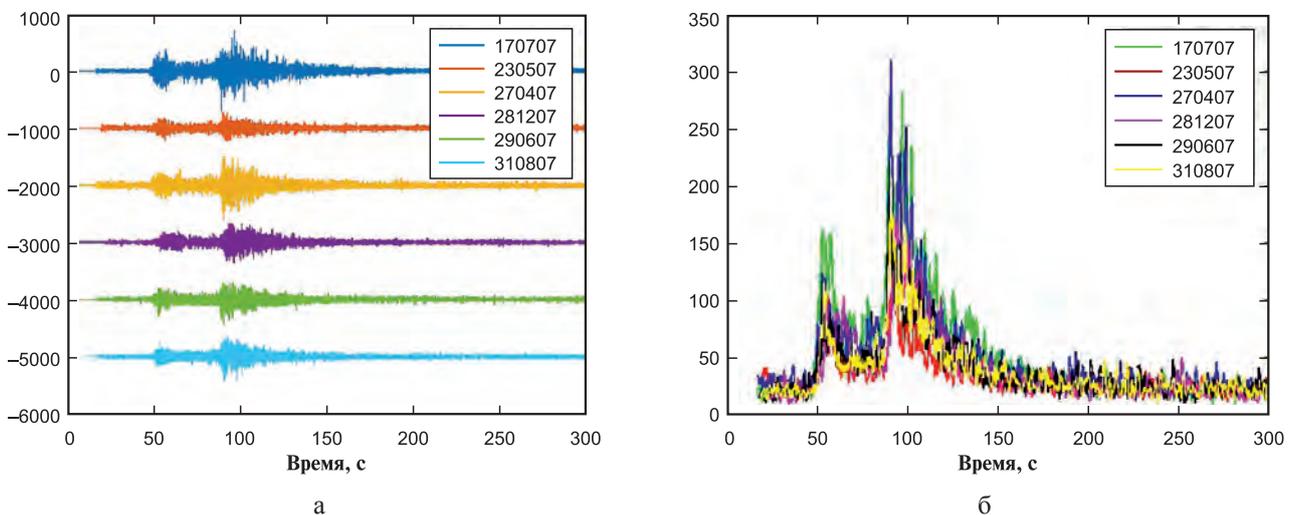
Метод SSR основан на предположении, что кода волны Lg состоит из однократно рассеянных волн [Xie, Nuttli, 1988], и область рассеянной энергии представляет собой эллипс с фокусами в точках расположения источника и приёмной станции [Pulli, 1984]. При этом влиянием рассеяния более высокого порядка пренебрегается, что достигается за счёт относительно короткого временного интервала коды Lg . Функция SSR определяется через сумму отношений амплитудных спектров в последовательных временных окнах. Мы используем модификацию SSR, предложенную в [Naghavi et al., 2012]. Согласно [Xie, Nuttli, 1988], спектр в фиксированном временном окне с номером m коды Lg на времени t_m определяется формулой:

$$S(f, t_m) = A_0 G_m(r) e^{-\pi f t_m / Q(f)}, \quad (1)$$

где $S(f, t_m)$ f , r , G и A_0 обозначают спектр, частоту, эпицентральное расстояние, функцию

Таблица 1. Параметры промышленных взрывов на карьере «Михайловский» по данным МСГ «Михнево»

Дата	Время в очаге	N	E	R	TP	TS	ML
27.01.2006	09:00:10.0	52.29	35.28	339	09:00:59	09:01:38	2.5
15.02.2006	09:00:12.0	52.33	34.9	340	09:01:01	09:01:39:94	2.8
22.11.2006	09:00:18.0	52.45	35.08	329	09:01:06:8	09:01:44:20	3.4
29.12.2006	08:59:50.0	52.37	35.41	327	09:00:38.3	09:01:15.70	3.3
17.01.2007	08:59:45.7	52.32	35.49	328	09:00:34	09:01:09	3.2
27.04.2007	08:00:02.5	52.32	35.48	329	08:00:51	08:01:26	2.9
23.05.2007	08:00:04.7	52.31	35.52	329	08:00:53	08:01:28	2.8
29.06.2007	08:00:37.3	52.29	35.44	333	08:01:26	08:02:02	2.8
31.08.2007	08:00:10.5	52.31	35.45	331	08:00:59	08:01:34	2.9
28.12.2007	09:00:15.8	52.32	35.48	329	09:01:04	09:01:39	2.9
14.01.2015	08:59:31.0	52.30	35.49	331	09:00:20	09:00:55	3.1
18.03.2015	09:00:21.0	52.32	35.33	334	09:01:09	09:01:46	3.2
28.01.2015	09:00:14.0	52.25	35.43	337	09:01:03	09:01:39	3.0
31.08.2015	08:59:44.6	52.32	35.48	334	09:00:31	09:01:14	2.8

**Рис. 1.** Пример записи взрывов на карьере «Михайловский», зарегистрированных в 2007 г.: а – волновые формы, полоса фильтрации 0.8–16 Гц; б – огибающие волновых форм, рассчитанные по методу среднеквадратичных амплитуд, сглаживание в интервале 1 с

геометрического расхождения и совокупный фактор, ответственный за источник, точку приёма, параметры приёмной аппаратуры. Тогда отношение этих величин в двух последовательных окнах с номерами m и $M+m$ представляет собой:

$$\frac{(S_{M+m} / G_{M+m})}{(S_m / G_m)} = e^{-\pi f (t_{M+m} - t_m) / Q(f)}. \quad (2)$$

В предположении постоянной величины геометрического расхождения функция F_k на частоте f_k определяется через среднее значение логарифма спектральных отношений:

$$F_k = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \frac{1}{\pi(t_{M+m} - t_m)} \ln \left[\frac{S_{m,k}}{S_{M+m,k}} \right]. \quad (3)$$

Если добротность представлена в форме $Q(f) = Q_0 F^\eta$, то линейная аппроксимация функции F_k в двойном логарифмическом масштабе позволяет одновременно определить значения Q_0 и η :

$$\ln(F_k) = (1 - \eta) \ln f_k - \ln Q_0 + \varepsilon. \quad (4)$$

Параметры, используемые при обработке волновых форм коды волны Lg

Начало коды фиксируется при групповой скорости 3.15 км/с. Конец коды в нашем случае определяется на уровне двукратного превышения уровня шума. Интервал времени, соответствующий коде, разделяется на N последовательных окон, с 50% перекрытием. В случае анализа коды региональных землетрясений в [Mitchell

et al., 1997, 2008] предлагается использовать окно длительностью 25.6 с при частоте дискретизации записи 20 Гц. В условиях относительно высокого уровня шума длительность коды Lg от карьерных взрывов не превышает 150–200 с, при этом оптимальным оказывается выбор длительности окна 10 с, соответственно, число окон в полной длине коды варьирует от 20 до 30.

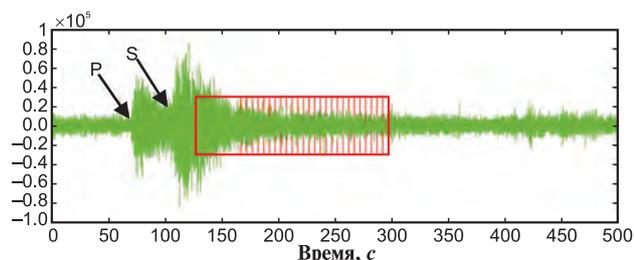


Рис. 2. Пример волновой формы события 18.03.2015 г. и временной диапазон определения параметров добротности по методу SSR

Метод SSR ориентирован на оценку интегрального параметра добротности коры, использует всю длину коды. При этом детальный анализ формы огибающей коды показывает, что она подразделяется на «раннюю», «среднюю» и «позднюю» коды [Rautian, Khalturin, 1978], в данном случае в интервалах длительностью 40–60, 60–80 и 100–120 с (рис. 16, 2). Принимая во внимание ограничения применяемого подхода к коде волны Lg , параметры «ранней» коды можно определить, применив алгоритм Х. Сато [Sato, 1977, 1988], разработанный для случая рассеянных S -волн близких землетрясений, что выходит за рамки данной статьи.

Результаты определения Q_0 и η

Параметры Q_0 и η определялись индивидуально по 14 волновым формам в интервале длительности коды 40–180 с, что соответствует количеству окон от 5–30 шириной 10 с. На рис. 3 показан вариант линейной аппроксимации F_k в диапазоне частот 2–7 Гц при длительности коды 110 с.

Характерной чертой большинства графиков функции F_k является особенность на частоте 1–2 Гц, не позволяющая продлить линейную аппроксимацию в область низких частот. Кроме того, наклон индивидуальных графиков варьирует в достаточно широких пределах в зависимости от избранного частотного диапазона. Поэтому для систематического анализа и определения зависимости параметров затухания от длительности коды были выбраны четыре

частотных диапазона: 2–6, 2–7, 3–6 и 3–7 Гц, в которых получены линейные частотные зависимости для большинства событий. При этом для каждой прямой рассчитывался коэффициент корреляции R .

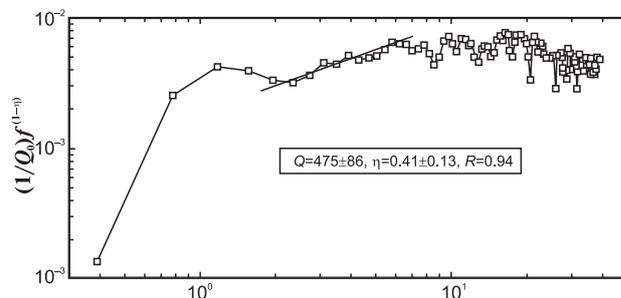


Рис. 3. Пример определения параметров Q_0 и η по линейной аппроксимации функции F_k в двойном логарифмическом масштабе. Результат анализа коды события на Михайловском ГОКе 31.08.2015 г., длина коды – 110 с.

Полученные значения: $Q_0=476\pm 86$; $\eta=0.41\pm 0.13$; $R=0.94\pm 0.13$, $P=0.94$

На рис. 4 представлены примеры расчёта коэффициентов Q_0 , η и коэффициента R соответствия графика F_k линейной зависимости для события 28.01.2015 года. В данном случае наилучшая линейная аппроксимация достигается при длительностях коды 60 с и 100–110 с.

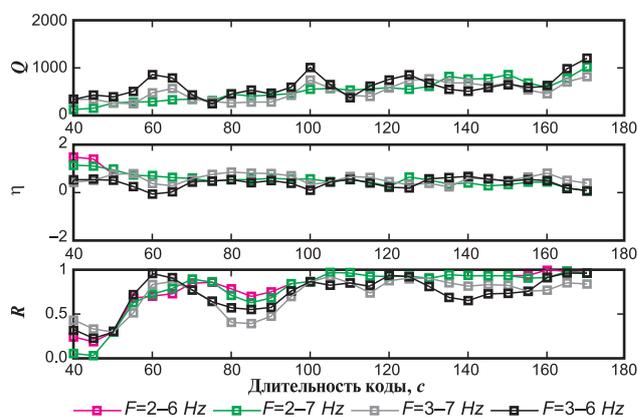


Рис. 4. Зависимость параметров Q_0 , η и коэффициента R от длительности коды при линейной аппроксимации функции F_k в различных частотных диапазонах для события 28.01.2015 г.

Максимальные значения R достигаются на временах в коде 60 с и 100–120 с

На рис. 5 даны усреднённые результаты расчёта параметров затухания методом SSR в 2007 г. и по всей совокупности событий 2006, 2007, 2015 гг. Наиболее представительные результаты

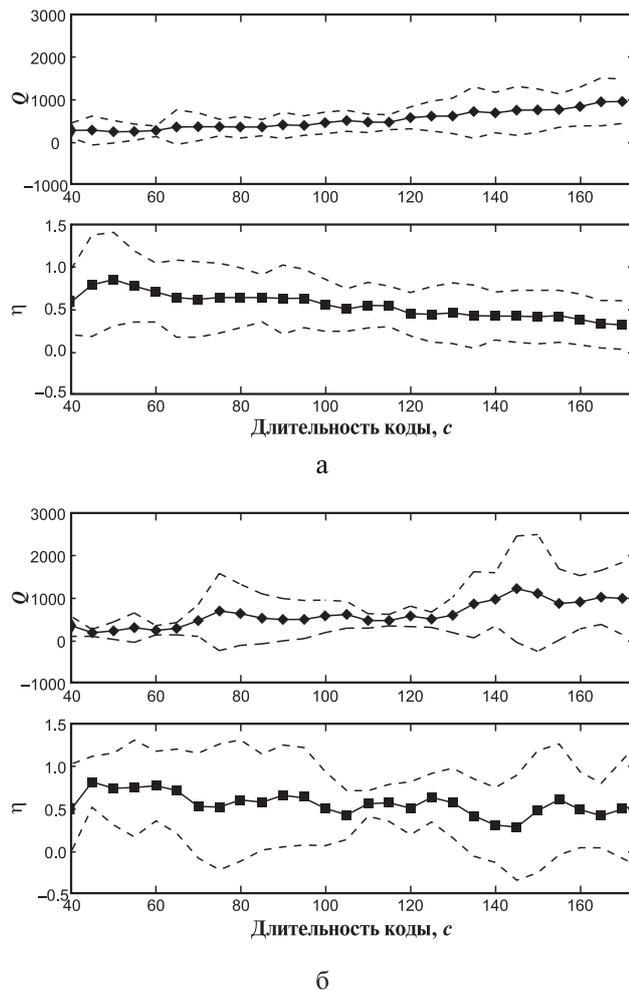


Рис. 5: а – результаты расчёта параметров затухания методом SSR по событиям 2006, 2007 и 2015 гг. на Михайловском ГОКе в диапазоне частот 3–7 Гц; б – результаты расчёта по событиям 2007 г. в диапазоне частот 3–6 Гц. Сплошные линии с маркерами соответствуют средним значениям по совокупности событий. Пунктиром показаны доверительные интервалы $\pm s$

получены при использовании диапазонов частот 3–6 и 3–7 Гц, а также компактной группы событий 2007 года.

Обсуждение результатов

В табл. 2 и на рис. 5 представлены параметры добротности, определённые по коде волны Lg в различных частотных диапазонах. Полученные значения Q_0 и η варьируют в широких пределах, в зависимости от частотного диапазона, в котором определяется соотношение между Q_0 и η . В исследованиях коды волны Lg в других регионах неоднократно отмечалось, что на частотах 1.5–2.0 Гц значительно снижается устойчивость линейной аппроксимации интервала коды, используемого в процедуре определения добротности [Ibáñez *et al.*, 1991]. В районе Южной Испании с толщиной осадочного слоя 3 км получено подтверждение существования особенностей в спектральных характеристиках коды Lg на частотах 1–3 Гц, которые приводят к завышению величины Q_0 . Этот эффект может быть вызван интерференцией с интенсивной поверхностной волной, что приводит к отсутствию естественного уменьшения амплитуды со временем. По мнению [Nazemi *et al.*, 2017], неоднозначность определения параметров добротности в низкочастотном диапазоне связана с разным характером распространения прямых и рассеянных волн в низкоскоростных осадках. Таким образом, наиболее информативным в нашем случае является диапазон 3–6 Гц, для которого определены средние значения $Q_0=584\pm 89$; $\eta=0.41\pm 0.06$ для полной длины коды 100–120 с и $Q_0=266\pm 55$; $\eta=0.65\pm 0.12$ для «ранней коды» длительностью 40–60 с (табл. 2).

В широком смысле характер затухания волны Lg, и, соответственно, величина добротности определяется свойствами коры, степенью её неоднородности. Добротность является также показателем сейсмической активности региона. В общем случае, высокие значения добротности соответствуют меньшему затуханию и меньшей тектонической активности. По мнению авторов [Sato *et al.*, 2012], значения Q_0 порядка 200 и 600

Таблица 2. Параметры добротности, определённые для различных частотных диапазонов: а – длительность коды 100–120 с; б – длительность коды 40–60 с

Частота, Гц	$Q_0 \pm \sigma(Q_0)$		$\eta \pm \sigma(\eta)$	
	а	б	а	б
2–6	738.9 ± 61.1	418.7 ± 102.6	0.30 ± 0.02	0.40 ± 0.06
2–7	661.7 ± 39.2	348.7 ± 87.2	0.35 ± 0.02	0.54 ± 0.10
3–6	584.9 ± 89.2	266.8 ± 55.5	0.41 ± 0.06	0.65 ± 0.12
3–7	490.7 ± 50.9	255.5 ± 18.9	0.50 ± 0.04	0.73 ± 0.10

разделяют районы с повышенной сейсмической активностью, зоны с умеренной сейсмичностью и стабильные территории.

Имеющиеся данные по добротности Lg -коды, полученные в [Mitchell et al., 1997, 2008, 2015] по данным землетрясений, носят обобщённый характер. Карты пространственного распределения параметров Q и η имеют низкое разрешение из-за отсутствия сети сейсмических станций в центральной части ВЕП и незначительного числа землетрясений на региональных расстояниях. Не приведены индивидуальные значения параметров затухания по отдельным станциям и направлениям, что исключает возможность сравнения наших данных с опубликованными результатами. Однако общее представление о добротности Восточно-Европейской платформы соответствует величинам Q , превышающим 700–800 при слабой частотной зависимости. Полученные нами значения в частотном диапазоне 3–6 Гц в большей степени соответствуют районам умеренной тектонической активности. В случае платформенной территории пониженное значение добротности, в нашем случае – вдоль трассы «Михнево» – карьер «Михайловский», свидетельствует о значительной неоднородности коры в целом и особенно её верхней части, связанное, в частности, с нарушением сплошности среды при проведении промышленных взрывов.

Включение области частот 1–3 Гц в определение $Q(f)$ приводит к повышенным значениям Q_0 и ослаблению частотной зависимости, характерному для стабильных тектонических территорий. Подобная ситуация отмечена при классификации трасс иранских землетрясений в [Kedrov O., Kedrov E., 2013], когда в полосе частот 3–6 Гц трассы источник – станция оцениваются как тектонические, однако на частотах 1.5–3.0 Гц они попадают в пограничную область между тектоническими и стабильными районами, т.е. одна и та же трасса может классифицироваться и как тектоническая, и как стабильная, в зависимости от сейсмического параметра, который применялся при классификации трассы.

Заключение

В сейсмически активных районах мира сейсмологами разных стран, включая российских [Dobrynina, 2011; Копничев и др., 2013], в настоящее время интенсивно применяются методы оценки параметров затухания по коде поперечных волн близких землетрясений. Параметры Lg -волн (амплитуда, частотные характеристики) используются в сейсмологической прак-

тике в качестве диагностического критерия при распознавании взрывов и землетрясений. Для территории центральной части ВЕП использование коды волны Lg для определения параметров добротности по данным промышленных взрывов выполнены впервые. Промышленные взрывы являются основным источником сейсмической энергии в центральной части Восточно-Европейской платформы. Основываясь на предположении, что динамические параметры сейсмических волн определяются свойствами среды, а не типом сейсмического источника, в работе продемонстрирована возможность использования разработанного в сейсмологии метода оценки добротности коры по коду волны Lg применительно к промышленным взрывам. Получены оценки параметров добротности методом SSR в различных частотных диапазонах, свидетельствующие о существенной неоднородности коры в целом, и особенно её верхней части.

Работа выполнена в рамках темы НИР АААА-А19-119022090015-6.

Литература

- Адушкин В.В. Сейсмичность взрывных работ на территории Европейской части России // Физика Земли. – 2013. – № 2. – С. 110–130.
- Алёшина Е.И., Асминг В.Э., Баранов С.В., Белевская М.А., Богинская Н.В., Варлашова Ю.В., Волосов С.Г., Габсатарова И.П., Голубева И.В., Данилова Т.В., Девяткина Л.В., Денег Е.Г., Денисенко Г.А., Децик И.В., Дягилев Р.А., Злобина Т.В., Иванова Л.Е., Карпинская О.В., Коваленко Н.С., Козьмин Б.М., Коломиец О.А., Комарова Р.С., Константиновская Н.Л., Лескова Е.В., Леуцук Н.М., Манушкина О.А., Москаленко Т.П., Мунирова Л.М., Надёжжа Л.И., Нахшина Л.П., Нестеркина М.А., Паришина И.А., Петров С.И., Пивоваров С.П., Подкорытова В.Г., Подлипская Л.А., Санина И.А., Селиванова Е.А., Славский А.В., Сохатюк А.С., Старикович Е.Н., Старкова Н.Н., Ферчева В.Н., Хастаева Е.В., Чернецова Е.Н., Шаталова О.А., Шевелева С.С., Шевкунова Е.В., Шибяев С.В. Сведения о наиболее крупных промышленных взрывах // Землетрясения России в 2015 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 179–192.
- Алёшина Е.И., Асминг В.Э., Виноградов А.Н., Габсатарова И.П., Голубева И.В., Гончаров А.И., Константиновская Н.Л., Комарова Р.С., Куликов В.И., Надёжжа Л.И., Нестеркина М.А., Осеев В.Г., Паришина И.А., Петров С.И., Пивоваров С.П., Пойгина С.Г., Санина И.А., Урбан Н.А., Черных О.А. Сведения о наиболее крупных промышленных взрывах // Землетрясения России в 2007 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2009. – С. 99–119.

- Асминг В.Э. Создание программного комплекса для автоматизации детектирования, локации и интерпретации сейсмических событий и его использование для изучения сейсмичности Северо-Западного региона: дисс. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. — М.: ИДГ РАН, 2004. — 272 с.
- Асминг В.Э., Виноградов А.Н., Габсатарова И.П., Голубева И.В., Девяткина Л.В., Константиновская Н.Л., Куликов В.И., Лещук Н.М., Надёжка Л.И., Нестеркина М.А., Петров С.И., Пивоваров С.П., Пойгина С.Г., Санина И.А., Черных О.А. Сведения о наиболее крупных промышленных взрывах // Землетрясения России в 2006 году. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2009. — С. 83–104.
- Башилов И.П., Волосов С.Г., Королёв С.А., Косарев Г.Л., Ризниченко О.Ю., Санина И.А. Широкополосная автономная цифровая сейсмическая станция АЦСС-3 // Сейсмические приборы. — 2013. — Т. 49, № 3. — С. 11–31.
- Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / Под ред. В.В. Адушкина и А.А. Маловичко. — М.: ГЕОС, 2013. — С. 287–342.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н., Соколов К.Н. Пространственно-временные вариации структуры поля поглощения S-волн в районе Невадского ядерного полигона // Физика Земли. — 2013. — № 6. — С. 39–48.
- Санина И.А., Волосов С.Г., Черных О.А., Асминг В.Э., Солдатенков А.М., Ризниченко О.Ю. Синтез и опыт экспериментального применения двухмерной малоапертурной сейсмической антенны «Михнево» // Сейсмические приборы. — 2008. — Вып. 44. — С. 3–18.
- Санина И.А., Волосов С.Г., Черных О.А., Ризниченко О.Ю. Малоапертурная сейсмическая антенна «Михнево»: новые возможности изучения сейсмичности Восточно-Европейской платформы // Доклады Академии наук. — 2009. — Т. 428, № 4. — С. 536–541.
- Aki K. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves // J. Geophys. Res. — 1969. — V. 74. — P. 615–631.
- Aki K., Chouet B. Origin of the coda waves: source, attenuation and scattering effects // J. Geophys. Res. — 1975. — V. 80. — P. 3322–3342.
- Dobrynina A.A. Coda-wave attenuation in the Baikal rift system lithosphere // Earth Planet. Int. — 2011. — V. 188. — P. 121–126.
- Havskov J., Sørensen M.B., Vales D., Özyazıcıoğlu M., Sánchez G., Li B. Coda Q in different tectonic areas, influence of processing parameters // Bull. Seismol. Soc. Am. — 2016. — V. 106. — P. 956–970.
- Herrmann R.B., Kijko A. Modeling some empirical vertical component Lg relations // Bull. Seismol. Soc. Am. — 1983. — V. 73. — P. 157–171.
- Ibáñez J.M., Morales J., De Miguel F., Vidal F., Alguacil G., Posadas A.M. Effect of a sedimentary basin on estimations of Q_C and Q_{Lg} // Phys. Earth Planet. Inter. — 1991. — V. 66. — P. 244–252.
- Kedrov O.K., Kedrov E.O. Spectral method for estimating the quality of the medium from one source and two stations // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. — 2013. — V. 49, N 2. — P. 177–190.
- 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. — V. 105. — P. 409–419.
- Mitchell B.J. An elastic structure and evolution of the continental crust and upper mantle from seismic surface wave attenuation // Rev. Geophys. — 1995. — V. 33. — P. 441–462.
- 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. — V. 113. — NB04303. doi: 10.1029/2007JB005065.
- Mitchell B.J., Pan Y., Xie J., Cong L. Lg coda Q variation across Eurasia and its relation to evolution // J. Geophys. Res. — 1997. — V. 102. — P. 22767–22779.
- Naghavi M., Shomali Z.H., Zare M. Lg Coda Variations in North-Central Iran // Int. J. Geophys. — 2012. — V. 2012. — Article ID 673506. — 7 p. doi: <https://doi.org/10.1155/2012/673506>.
- Nazemi N., Pezeshk S., Sedaghati F. Attenuation of Lg waves in the New Madrid seismic zone of the central United States using the coda normalization method // Tectonophysics. — 2017. — V. 712. — P. 623–633. doi: 10.1016/j.tecto.2017.06.026.
- Press F., Ewing M. Two slow surface waves across North America // Bull. Seismol. Soc. Am. — 1952. — V. 42. — P. 219–228.
- Pullii J.J. Attenuation of coda waves in New England // Bull. Seismol. Soc. Am. — 1984. — V. 74. — P. 1149–1166.
- Rautian T.G., Khalturin V.I. The use of coda for determination of the earthquake source spectrum // Bull. Seismol. Soc. Am. — 1978. — V. 68. — P. 923–948.
- Sato H. Energy propagation including scattering effect // J. Phys. Earth. — 1977. — V. 25. — P. 27–41.
- Sato H. Fractal interpretation of the linear relation between logarithms of maximum amplitude and hypocentral distance // Geophys. Res. Lett. — 1988. — V. 15. — P. 373–375.
- Sato H., Fehler M.C., Maeda T. Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous Earth, Second Ed. — Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2012. — 494 p.
- Xie J., Nuttli O.W. Interpretation of high-frequency coda at large distances: Stochastic modeling and method of inversion // Geophys. J. — 1988. — V. 95. — P. 579–595.

Сведения об авторах

Тарасов Станислав Андреевич, инженер Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: tarasovidgran@mail.ru

Ризниченко Оксана Юрьевна, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. ИДГ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: oksanastp@mail.ru

Санина Ирина Альфатовна, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр. ИДГ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: irina@idg.chph.ras.ru

Варыпаев Александр Вячеславович, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. ИДГ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: avalex89@gmail.com

Воронин Глеб Олегович, техник ИДГ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: tarasovidgran@mail.ru

Lg-coda Q in the central part of the East European platform from small aperture array “Mikhnevo” data

© 2019 S.A. Tarasov, O.Yu. Riznichenko, I.A. Sanina, A.V. Varypaev, G.O. Voronin

IDG RAS, Moscow, Russia

Abstract Whereas the quality factor Q is one of the basic parameters required in seismic hazard estimation, no systematic studies of seismic attenuation factors has been carried out in the central part of the East European Platform due to the lack of dense seismic network and a small number of regional earthquakes. The main part of the events, recorded by the small aperture array “Mikhnevo” 80 km to the south of Moscow, consists of industrial explosions of different magnitude. The idea of the paper is to apply conventional seismic methods to the analysis of seismic waveforms of the industrial explosions. The paper focuses on the Lg coda of the quarry blast in “Mikhailovsky” quarry 300 km from the array. Vertical components of the short-period and broad band records of the sensors positioned in the well at the depth 20 m are processed according to the SSR algorithm, suggested by Xie and Nuttli, 1988, and extensively used by Mitchell et al in different regions of the world. The advantages of the method imply exclusion of the source and site characteristics by taking spectral ratios of the successive time windows of the coda. Compared to the earthquake waveforms, the Lg coda of explosions is shorter, less regular and contains higher frequencies. The length of coda varies according to the noise level. We selected 14 events from the same quarry in different years, which demonstrate remarkable stability of the waveforms. All the events were processed individually to obtain the frequency dependence of Q in the form $Q(f) = Q_0 f^\eta$, where Q_0 is the Q factor at the frequency 1 Hz and η is the power. To produce stable estimates of Q_0 and η individual values were averaged for frequency bands: 2-6 Hz, 2-7 Hz, 3-6 Hz, 3-7 Hz for different length of coda. The preferable frequency range for Lg coda Q studies of quarry blasts is suggested as 3-6 Hz, which avoids instability of coda in 1-3 Hz interval, presumably caused by local site effect, connected with the 3 km thick sedimentary layer. The Q estimate of $Q_0 = 584 \pm 89$, $\eta = 0.41 \pm 0.06$ proves considerable heterogeneity of the upper crust in the region. Speaking about Q factor as an indicator of the tectonic activity, the studied area can be related to a region of moderate activity.

Keywords quality factor, Lg -coda, industrial explosions, East European Platform, SSR method.

For citation Tarasov, S.A., Riznichenko, O.Yu., Sanina, I.A., Varypaev, A.V., & Voronin, G.O. (2019). [Lg coda Q in the central part of the East European platform from small aperture array “Mikhnevo” data]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 1(1), 57-66. (In Russ.). doi: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2019.1.05>

References

- Adushkin, V.V. (2013). Blasting-induced seismicity in the European part of Russia. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 49(2), 258-277.
- Adushkin, V.V., & Malovichko, A.A. (Eds.). (2013). *Vzryvy i zemletryaseniya na territorii Evropeiskoi chasti Rossii* [Explosions and earthquakes on the European territory of Russia]. Moscow, Russia: GEOS Publ., 384 p. (In Russ.).
- Aki, K. (1969). Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. *Journal of Geophysical Research*, 74(2), 615-631.
- Aki, K., & Chouet, B. (1975). Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects. *Journal of Geophysical Research*, 80(23), 3322-3342.
- Aleshina, E.I., Asming, V.E., Baranov, S.V., Belevskaya, M.A., Boginskaya, N.V., Varlashova, Yu.V., Volosov, S.G., Gabsatarova, I.P., Golubeva, I.V., Danilova, T.V., Devyatkina, L.V., Denega, E.G., Denisenko, G.A., Detsik, I.V., Diagilev, R.A., Zlobina, T.V., Ivanova, L.E., Karpinskaya, O.V., Kovalenko, N.S., Kos'min, B.M., Kolomiets, O.A., Komarova, R.S., Konstantinovskaya, N.L., Leskova, E.V., Leschuk, N.M., Vanushkina, O.A., Moskalenko, T.P., Munirova, L.M., Nadezhka, L.I., Nakhshina, L.P., Nesterkina, M.A., Parshina, I.A., Petrov, S.I., Pivovarov, S.P., Podkorytova, V.G., Podlipskaya, L.A., Sanina, I.A., Selivanova, E.A., Slavskiy, A.V., Sokhatyuk, A.S., Starikov, E.N., Starkova, N.N., Fercheva, V.N., Khastaeva, E.V., Chernetsova, E.N., Shatalova, O.A., Sheveleva, S.S., Shevkunova, E.V., & Shibaev, S.V. (2017). [Information on the largest industrial explosions]. In *Zemletryaseniia Rossii v 2015 godu* [Earthquakes in Russia in 2015] (pp. 179-192). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Aleshina, E.I., Asming, V.E., Vinogradov, A.N., Gabsatarova, I.P., Golubeva, I.V., Goncharov, A.I., Komarova, R.S., Konstantinovskaya, N.L., Kulikov, V.I., Nadezhka, L.I., Nesterkina, M.A., Oseev, V.G., Parshina, I.A., Petrov, S.I., Pivovarov, S.P., Poygina, S.G., Sanina, I.A., Urban, N.A., & Chernykh, O.A. (2009). [Information on the largest industrial explosions]. In *Zemletryaseniia Rossii v 2007 godu* [Earthquakes in Russia in 2007] (pp. 99-119). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Asming, V.E. (2004). [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, 272 p.
- Asming, V.E., Vinogradov, A.N., Gabsatarova, I.P., Golubeva, I.V., Devyatkina, L.V., Konstantinovskaya, N.L., Kulikov, V.I., Leschuk, N.M., Nadezhka, L.I., Nesterkina, M.A., Petrov, S.I., Pivovarov, S.P., Poygina, S.G., Sanina, I.A., & Chernykh, O.A. (2009). [Information on the largest industrial explosions]. In *Zemletryaseniia Rossii v 2006 godu* [Earthquakes in Russia in 2006] (pp. 83-104). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Bashilov, I.P., Volosov, S.G., Korolyov, S.A., Kosarev, G.L., Riznichenko, O.Y., & Sanina, I.A. (2014). The ADSS-3 broadband stand-alone digital seismic station. *Seismic Instruments*, 50(3), 177-191.
- Dobrynina, A.A. (2011). Coda-wave attenuation in the Baikal rift system lithosphere. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 188(1-2), 121-126.
- Havskov, J., Sørensen, M.B., Vales, D., Özyazıcıoğlu, M., Sánchez, G., & Li, B. (2016). Coda Q in different tectonic areas, influence of processing parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(3), 956-970.
- Herrmann, R.B., & Kijko, A. (1983). Modeling some empirical vertical component Lg relations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(1), 157-171.
- Ibáñez, J.M., Morales, J., De Miguel, F., Vidal, F., Alguacil, G., & Posadas, A.M. (1991). Effect of a sedimentary basin on estimations of Q_C and Q_{Lg} . *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 66(3-4), 244-252.
- Kedrov, O.K., & Kedrov, E.O. (2013). Spectral method for estimating the quality of the medium from one source and two stations. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 49(2), 177-190.
- Kopnichev, Y.F., Sokolova, I.N., & Sokolov, K.N. (2013). Spatio-temporal variations in the structure of the attenuation field of the S -wave in the region of Nevada nuclear test site. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 49(6), 786-795.
- Mitchell, B.J. (1995). An elastic structure and evolution of the continental crust and upper mantle from seismic surface wave attenuation. *Reviews of Geophysics*, 33(4), 441-462.
- Mitchell, B.J., Cong, L., & Ekström, G. (2008). A continent-wide map of 1-Hz Lg coda Q variation across Eurasia and its relation to lithospheric evolution. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B4). doi: 10.1029/2007JB005065.
- Mitchell, B.J., Cong, L., & Jemberie, A.L. (2014). Continent-wide maps of Lg coda Q for North America and their relationship to crustal structure and evolution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1), 409-419.
- Mitchell, B.J., Pan, Y., Xie, J., & Cong, L. (1997). Lg coda Q variation across Eurasia and its relation to evolution. *Journal of Geophysical Research*, 102, 22767-22779.
- Naghavi, M., Shomali, Z.H., & Zare, M. (2012). Lg coda variations in north-central Iran. *Geophysical Journal International*. doi: 10.1115/2012/673506.
- Nazemi, N., Pezeshk, S., & Sedaghati, F. (2017). Attenuation of Lg waves in the New Madrid seismic zone of the central United States using the coda normalization

- method. *Tectonophysics*, 712, 623-633. doi: 10.1016/j.tecto.2017.06.026.
- Press, F., & Ewing, M. (1952). Two slow surface waves across North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 42(3), 219-228.
- Pulli, J.J. (1984). Attenuation of coda waves in New England. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(4), 1149-1166.
- Rautian, T.G., & Khalturin, V.I. (1978). The use of the coda for determination of the earthquake source spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68(4), 923-948.
- Sanina, I.A., Volosov, S.G., Chernykh, O.A., Asming, V.E., Soldatenkov, A.M., & Riznichenko, O.Y. (2008). The design and experimental use of the Mikhnevo 2D small aperture seismic array. *Seismic Instruments*, 44(1), 1-11.
- Sanina, I.A., Volosov, S.G., Chernykh, O.A., & Riznichenko, O. Yu. (2009). [Small-aperture array "Mikhnevo": new opportunities for the study of seismicity on the East European Platform]. *Doklady Akademii Nauk* [Proceeding of the Academy of Sciences], 428(4), 536-541. (In Russ.)
- Sato, H. (1977). Energy propagation including scattering effect. *Journal of Physics of the Earth*, 25, 27-41.
- Sato, H. (1988). Fractal interpretation of the linear relation between logarithms of maximum amplitude and hypocentral distance. *Geophysical Research Letters*, 15, 373-375.
- Sato, H., Fehler, M.C., & Maeda, T. (2012). *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous Earth, Second Ed.* Berlin, Germany: Springer-Verlag, 494 p.
- Xie, J., & Nuttli, O.W. (1988). Interpretation of high-frequency coda at large distances: Stochastic modeling and method of inversion. *Geophysical Journal International*, 95, 579-595.

Information about authors

Tarasov Stanislav Andreevich, Engineer of the Institute of Geospheres Dynamics of the Russian Academy of Sciences (IDG RAS), Moscow, Russia. E-mail: tarasovidgran@mail.ru

Riznichenko Oksana Yur'evna, PhD, Leading Researcher of the IDG RAS, Moscow, Russia. E-mail: oksanastp@mail.ru

Sanina Irina Al'fatovna, Dr., Chief Researcher of the IDG RAS, Moscow, Russia. E-mail: irina@idg.chph.ras.ru

Varypaev Aleksandr Viacheslavovich, PhD, Senior Researcher of the IDG RAS, Moscow, Russia. E-mail: avalex89@gmail.com

Voronin Gleb Olegovich, Technician of the IDG RAS, Moscow, Russia. E-mail: tarasovidgran@mail.ru