

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОБРОТНОСТИ СРЕДЫ НА ТЕРРИТОРИИ РУДНИКОВ НА ПРИМЕРЕ ВЕРХНЕКАМСКОГО И ЖЕЗКАЗГАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А.С. Мурыськин

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: в статье представлены результаты оценки добротности для территорий Верхнекамского и Жезказганского месторождений. Детально описаны требования к подготовке данных, теоретические основы метода и выполнения измерений. Представлено обоснование для применения данной методики и невозможность использования для оценки добротности среды кода-волн.

Ключевые слова: добротность, Верхнекамское месторождение, Жезказганское месторождение, рудник Жомарт, методика Гладвина-Стейси, затухание, сейсмические волны, импульс.

При распространении в реальных средах сейсмические волны рассеиваются и несут информацию не только об источнике, но и о геологическом разрезе. Затухание сейсмических волн – снижение интенсивности упругих колебаний, обусловленное явлениями поглощения, геометрического расхождения и рассеяния энергии волн при распространении их в геологической среде по мере удаления от источника. При распространении в реальной среде сейсмические волны преломляются, отражаются и рассеиваются на различных неоднородностях. Также свой вклад в потерю энергии волны вносит поглощение из-за неидеальной упругости среды. Существуют различные методы оценки поглощающих свойств среды, многие из которых основаны на изучении кода-волн. Кода-волны являются рассеянными на неоднородностях среды поперечными волнами.

Затухание количественно оценивают коэффициентом затухания σ , который является потерей энергии на единицу длины (метр или километр). Часто для оценки затухания колебаний вводится параметр добротности Q , который является безразмерным. Численно добротность равна отношению начальной энергии к энергии поглощенной средой за один период колебаний с частотой ω [1,2]:

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

где Q – добротность среды, E – начальная энергия сейсмической волны, ΔE – изменение энергии сейсмической волны, при прохождении пути равного длине волны.

Добротность обратно пропорциональна затуханию. Связь между коэффициентом затухания σ и добротностью Q выражается формулой (2):

$$Q = \pi f/V\sigma, \quad (2)$$

где V – скорость сейсмической волны. Чаще всего принимается, что величина добротности Q является частотно-зависимой, по крайней мере, для частоты $f \geq 1$ Гц [4].

В работе [3] предложена методика Гладвина-Стейси для численной оценки добротности неупругой среды по изменению длительности сигнала. Метод основан на простой идее, что в реальных средах высокие частоты затухают быстрее, чем низкие. Рассмотрим сейсмический импульс, который проходит через среду с добротностью Q . Длительность импульса в каждый момент времени можно определить как

$$\tau = \tau_0 + Ct/Q, \quad (3)$$

где τ – это половина длительности импульса в момент времени t , τ_0 – половина начальной длительности импульса, C – эмпирический коэффициент формы фронта волны, Q – добротность среды. Для объемных волн $C = 0.5$. Зная скорость сейсмической волны в среде, мы можем определить длительность импульса в любой точке пространства:

$$\tau = \tau_0 + Cr/VQ, \quad (4)$$

где r – гипоцентральное расстояние, V – скорость сейсмической волны.

Теперь необходимо в обратном порядке определить добротность среды с использованием волновых форм землетрясений. Получив выборку с достаточно высоким соотношением сигнал/помеха для одного и того же события на станциях с разным удалением от очага, по сейсмическим записям определяется длина импульса.

Из уравнения (4) видно, что это классическая линейная функция и добротность связана с коэффициентом наклона прямой:

$$k = C/VQ, \quad (5)$$

$$Q = C/kV, \quad (6)$$

где k – коэффициент наклона уравнения линейной регрессии.

В итоге получаем количественную оценку добротности, основанную на простой и надежной зависимости. К плюсам данного подхода можно отнести легкость и скорость выполнения, надежность. К минусам – отсутствие частотной зависимости для добротности. На выходе имеем какую-то среднюю добротность. Поэтому следует использовать землетрясения только с близкими оценками по магнитуде, так как их частотный состав не будет сильно отличаться. Для определения добротности среды в региональном масштабе на сегодняшний день очень популярны различные методики с использованием кода-волн. В работе для определения добротности будет использоваться описанная выше методика Гладвина-Стейси, так как сейсмические события на рудниках обычно имеют небольшую магнитуду, при этом уровень шумов довольно высок, что не дает возможности уверенно выделить кода-волны.

Оценка добротности выполнялась для территорий Жезказганского месторождения, рудника Жомарт и рудника СКРУ-1 (Верхнекамское месторождение). Измерения проводились следующим образом:

- 1) выборка волновых форм сейсмических событий в определенном диапазоне магнитуд (не менее 20 для каждого объекта). Соблюдение минимальных требований для локации очага – минимум 3 станции должны зарегистрировать сейсмическое событие;
- 2) обработка волновых форм, выделение вступлений Р- и S-волн, локация очагов землетрясений, отбраковка записей при большой ошибке локации;
- 3) замер гипоцентрального расстояния до каждой станции в выборке;
- 4) замер длительности импульса первых вступлений на волновых формах сейсмического события.

В итоге по каждому событию в выборке получена таблица измерений, пример приведен в таблице 1. Далее необходимо определить зависимость длительности импульса от расстояния, по наклону которой можно выйти на добротность (рис. 1).

Таблица 1

Пример результатов измерений по одному сейсмическому событию

Станция	Время начала импульса, с	Время конца импульса, с	$2 \cdot \tau$, с	τ , с	Расстояние, км
s117	12.857	12.884	0.027	0.0135	1.399
s111	13.272	13.31	0.038	0.019	3.464
s118	13.285	13.335	0.05	0.025	3.405
s115	13.381	13.42	0.039	0.0195	3.959
s114	13.666	13.723	0.057	0.0285	5.334
s109	13.849	13.91	0.061	0.0305	6.303
s106	13.887	13.947	0.06	0.03	6.363

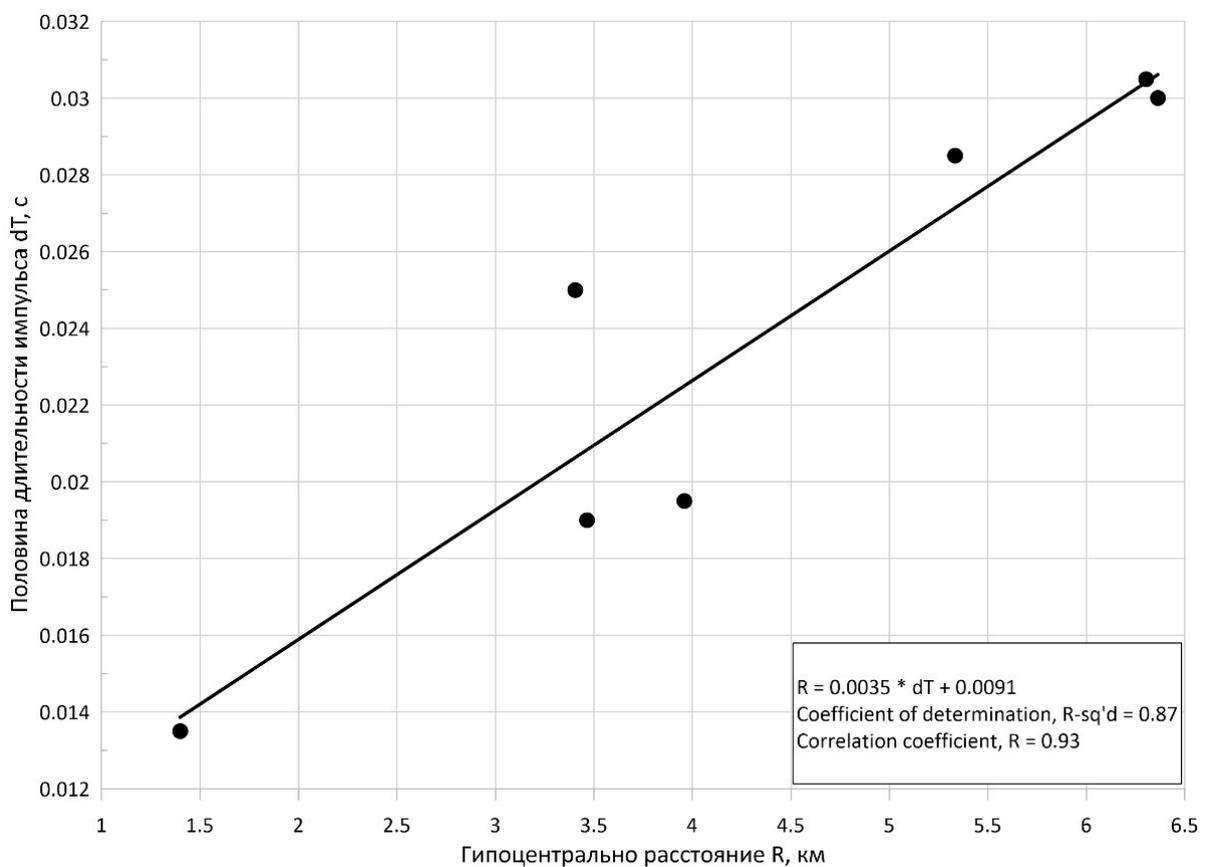


Рис. 1. Зависимость длины импульса от расстояния на примере одного сейсмического события

На последнем этапе необходимо оценить среднюю добротность по каждой станции отдельно и убрать из расчета станции с малым количеством замеров. В данной работе для расчета убраны все станции, которые участвовали менее, чем в 5 замерах. Такой подход позволяет определить добротность среды независимо от грунтовых условий и избавиться от сильных выбросов, которые могут быть связаны с индивидуальными особенностями отдельных сейсмических событий. Ниже приведены таблицы с результатами расчетов.

Таблица 2

Результаты количественной оценки добротности для рудника Жомарт

Станция	Средняя добротность	Количество измерений
s02	61.2	14
s05	57.1	10
s04	47.1	5
s01	57.9	14
s09	62.8	14
s03	55.6	7
s10	76.7	10
s11	77.0	8
s06	51.8	5
Общий итог	61.9	87

Таблица 3

Результаты количественной оценки добротности для Жезказганского месторождения

Станция	Средняя добротность	Количество измерений
s105	53.9	5
s106	67.0	8
s107	64.7	15
s108	69.8	10
s109	65.7	14
s111	62.7	13
s112	71.3	9
s114	62.6	11
s116	78.8	6
s117	64.9	15
s118	67.4	7
s120	69.0	15
Общий итог	66.4	128

Таблица 4

Результаты количественной оценки добротности для рудника СКРУ-1

Станция	Средняя добротность	Количество измерений
s110	33.5	15
s111	34.4	12
s12	33.5	15
s14	29.5	9
Общий итог	33.0	51

По результатам измерений средняя добротность между отдельными станциями на всех объектах отличается от средней по месторождению не более чем на 20%. Также почти не отличается добротность между рудником Жомарт и Жезказганским месторождением, так как они относятся к одной территории и имеют схожее геологическое строение. Сильно ниже получилась оценка добротности СКРУ-1, это обусловлено наличием большего количества рыхлых пород в геологическом строении Верхнекамского месторождения (мергели, глины), по сравнению с Жезказганским месторождением. Сводный результат по всем объектам представлен в таблице 5.

Таблица 5

Результаты оценки добротности на территории рудников

Объект	Итоговая добротность
Рудник Жомарт	61.9
Жезказганское месторождение	66.4
Рудник СКРУ-1	33.0

Можно сделать вывод, что полученные результаты устойчивы и могут использоваться для решения различных задач шахтной сейсмологии. Наиболее перспективным представляется анализ пространственного распределения добротности на различных масштабных уровнях, а также мониторинг ее изменения со временем. Знание параметров затухания сейсмических волн также очень важно для корректного расчета регистрационных возможностей действующих и проектируемых систем сейсмологического мониторинга.

Таким образом, метод Гладвина-Стейси позволяет надежно и просто определить добротность среды по изменению длительности сейсмического импульса во времени и пространстве. Данная методика требует только наличие четких первых вступлений, на которых можно надежно определить длительность первого импульса на разных удалениях от очага.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500029-1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aki K., Chouet B. Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering // Journal of Geophysical Research: Solid Earth and Planets. – 1975. – Vol. 80, № 23. – P. 3322-3342.
2. Aki K. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves // Journal of Geophysical Research. – 1969. – V. 74, № 2. – P. 615-631.
3. Gladwin M.T., Stacey F.D. Anelastic degradation of acoustic pulses in rock // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1973. – V. 8, № 4. – P. 332-336.
4. Havskov, J., Ottemöller L. Routine Data Processing in Earthquake Seismology [Electronic resource]. – Springer, 2010. – 352 с.