

УДК 550.831

В.С. Немцов¹

СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА НЕУПРУГОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Moscow State University, Faculty of Geology, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Рассмотрены вопросы оценки добротности среды на основе модельных сейсмических данных. Представлен краткий обзор программных продуктов, позволяющих моделировать волновое поле с учетом добротности среды. Проанализированы полученные результаты моделирования, а также возможность дальнейшего использования для других исследований. Сравнение алгоритмов расчета добротности среды на простой модели в зависимости от соотношения сигнал/помеха дает реальную оценку погрешности определения Q -фактора на модельных сейсмических данных, что можно использовать на практике.

Ключевые слова: обработка сейсмических данных, добротность, коэффициент поглощения, метод спектральных отношений, метод сдвига центральной частоты, соотношение сигнал/помеха.

The article is devoted to the assessment of the Q -factor of the medium using model seismic data. Investigations include the brief overview of seismic modeling software that allows modeling the wave field accounts Q -factor. The comparison of results obtained with Q -calculating algorithms and model seismic data with different signal to noise ratio gives a real estimate of the error in determining of Q -factor. This fact can be taken into account in the time processing of the real seismic data.

Key words: processing of seismic data, methods of q -factor estimation, q -factor, spectral ratio method, frequency pick shift method, signal to noise ratio.

Введение. Рассмотрение сейсмического волнового поля часто осуществляется в рамках некоторых допущений: модель среды представляется идеально упругой, распространение волнового поля описывается волновым уравнением как в упругом, так и в акустическом представлении. На практике же распространение волн имеет ряд особенностей, которые отличают зарегистрированное волновое поле от теоретически рассчитанного на примере идеально упругой модели. Наличие пористости, трещиноватости, анизотропии в горных породах приводит к искажению регистрируемых волновых полей, а расчет синтетического волнового поля на примере идеализированных сред приводит к ошибкам при сравнении с реальными данными.

В общем случае в неупругих (вязкоупругих) моделях среды происходит поглощение сейсмической энергии, что приводит к уменьшению амплитуды и изменению частотного состава сигнала. Описанное явление рассматривается как естественное влияние среды на энергию сейсмического сигнала. Изучение механизма образования этого эффекта и его учет при обработке сейсмических данных позволяют извлекать более полную информацию о свойствах пород по результатам сейсмической инверсии, что в свою очередь и придает актуальность этой проблеме.

Однако получить точные значения добротности среды (Q) в реальных условиях невозможно из-за неоднородности регистрации сейсмических данных, а также присутствия фона случайных и регулярных помех. Для изучения вопроса ошибки расчета Q и возможности его применения на последующих этапах обработки сейсмических данных выполнено акустическое моделирование сейсмограмм общего пункта взрыва (ОПВ) с учетом Q и опробование методик расчета добротности среды в зависимости от качества сейсмических данных (атрибута соотношения сигнал/помеха, S/N). Проведенные исследования позволили получить исковую оценку погрешности определения Q .

Теоретический обзор. В явлении сейсмического затухания выделяются две составляющие: рассеивание и непосредственно само поглощение (внутреннее). Рассеивание вызвано объемными неоднородностями много меньше длины волн, на поверхности или в самой среде, которые приводят к частичному перераспределению потока энергии. [O'Doherty, Anstey, 1971; Richards, Menke, 1983; Sato, Fehler, 1998]. Другой наиболее интересный механизм с практической точки зрения для геофизики — внутреннее поглощение, обусловленное трением между зернами в матрице породы и между скелетом и флюидом. На природу внутреннего

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, аспирант; e-mail: nemcov.v.s@gmail.com

поглощения также влияет нефтегазонасыщение породы. В работе [Уайт и др., 1975] рассмотрены потери энергии, связанные с перемещением контактной поверхности между флюидами (жидкостью и газом) при прохождении волны через породу.

Отмеченные выше взаимодействия в среде имеют необратимый характер преобразования упругой энергии в тепловую. На практике разделить между собой эти эффекты практически невозможно [Авербух, 1982]. Поэтому автор рассмотрел совокупность процессов, которая будет представлять собой эффективное поглощение в среде. Для описания процесса поглощения существует много математических моделей, которые описывают изменения коэффициента добротности Q от частоты. [Carcione, Picotti, 2006; Pride et al., 2004; Ricker, 1953]. С теоретической точки зрения математические модели с частотно зависимым фактором добротности точнее описывают распространение волнового поля в неупругих средах. Результаты лабораторных исследований подтверждают модели с частотно зависимым фактором поглощения [Берзон и др., 1973]. Применение более сложных моделей поглощения на практике затруднено из-за их зависимости от некоторых параметров, не измеряемых на практике [Dvorkin et al., 1995]. Для использования фактора добротности среды вводится допущение, что Q не изменяется в зависимости от частоты в сейсмическом диапазоне 10–200 Гц. Однако даже такое допущение в описании распространения волнового поля не решает проблему, связанную с амплитудными и фазовыми искажениями сигнала, причина которых заключена во внутреннем поглощении и дисперсии групповой скорости в среде соответственно. На практике амплитудная и фазовая коррекции искажений применяются совместно, однако часто используется только фазовая компенсация неупругого поглощения из-за невысокой точности определения Q .

Материалы и методы исследований. Подготовка данных. Для изучения вопроса ошибки расчета Q и возможности его применения на последующих этапах обработки сейсмических данных были использованы модельные (синтетические) сейсмограммы общего пункта взрыва. Существует ряд программных продуктов от мировых университетов и коммерческих организаций для расчета синтетических сейсмограмм. Все они имеют преимущества и недостатки в реализации, однако выделить один программный продукт, который бы был универсальным инструментом для широкого спектра задач, не представляется возможным. В ходе исследования автором изучены и опробованы следующие программные продукты Tesserat 2D (Канада, Tesserat Technologies), SeismicUnix (США, Colorado School of Mines), Sofi2D (Германия, Karlsruher Institut für Technologie). В рамках каждого пакета выполнены следующие этапы:

1) создание горизонтальнослоистой модели среды со следующими параметрами:

1-й слой: $V_{p1} = 1000$ м/с, $H_1 = 500$ м, $\rho_1 = 1$ г/см³;

2-й слой: $V_{p2} = 1800$ м/с, $H_2 = 350$ м, $\rho_2 = 1,8$ г/см³;

3-й слой: $V_{p3} = 2230$ м/с, $H_3 = 600$ м, $\rho_3 = 2$ г/см³;

4-й слой: $V_{p4} = 3000$ м/с, $H_4 = 850$ м, $\rho_4 = 2,2$ г/см³;

5-й слой: $V_{p5} = 3160$ м/с, $\rho_5 = 2,3$ г/см³,

где V_{pi} — скорость распространения продольных волн в слое, ρ_i — плотность породы, H_i — мощность пласта. Для каждого слоя коэффициент добротности среды был равен 100. В качестве опорного сигнала взят импульс Рикера с центральной частотой 25 Гц, шаг дискретизации 4 мс; система наблюдений фланговая, расстояние между пунктами взрыва 100 м, между пунктами приема — 25 м, минимальное удаление 0 м. Сравнение результатов моделирования с учетом и без учета добротности среды Q на примере сейсмограмм ОПВ;

2) опробование базовой методики спектральных отношений («Spectral ratio method») для определения значения Q -фактора на примере синтетических сейсмограмм ОПВ;

3) анализ результатов моделирования. Сравнение исходных и расчетных значений коэффициентов добротности среды.

Здесь не приводится подробный разбор каждого программного продукта, однако представлены основные выводы. Все перечисленные выше пакеты для моделирования волнового поля включают в себя опцию расчета сейсмограмм ОПВ с учетом параметра добротности среды. Для дальнейших исследований автором были выбраны сейсмограммы, полученные с помощью лучевого моделирования в пакете Seismic Unix, поскольку в этом программном продукте затухание и поглощение в среде рассчитывается в явном виде после определения кинематических характеристик отражения. В итоге такой подход коррекции динамических характеристик сворачиваемого импульса позволяет с хорошей степенью точности привести форму сигнала к его наблюдаемой форме на реальных данных, причем как качественно, так и количественно. Сейсмограммы, полученные с помощью конечно-разностных алгоритмов, содержали незначительную шумовую компоненту, что могло вносить дополнительную погрешность в расчет Q . Таким образом, для наглядности изучения компенсации неупругого поглощения и методик оценки добротности были выбраны сейсмограммы, рассчитанные в пакете Seismic Unix (рис. 1).

Сравнение методик оценки добротности среды. Значения коэффициента добротности среды рассчитывали с помощью метода спектральных соотношений [Spencer et al., 1982; Tonn, 1991], метода спектральных соотношений на основе функции

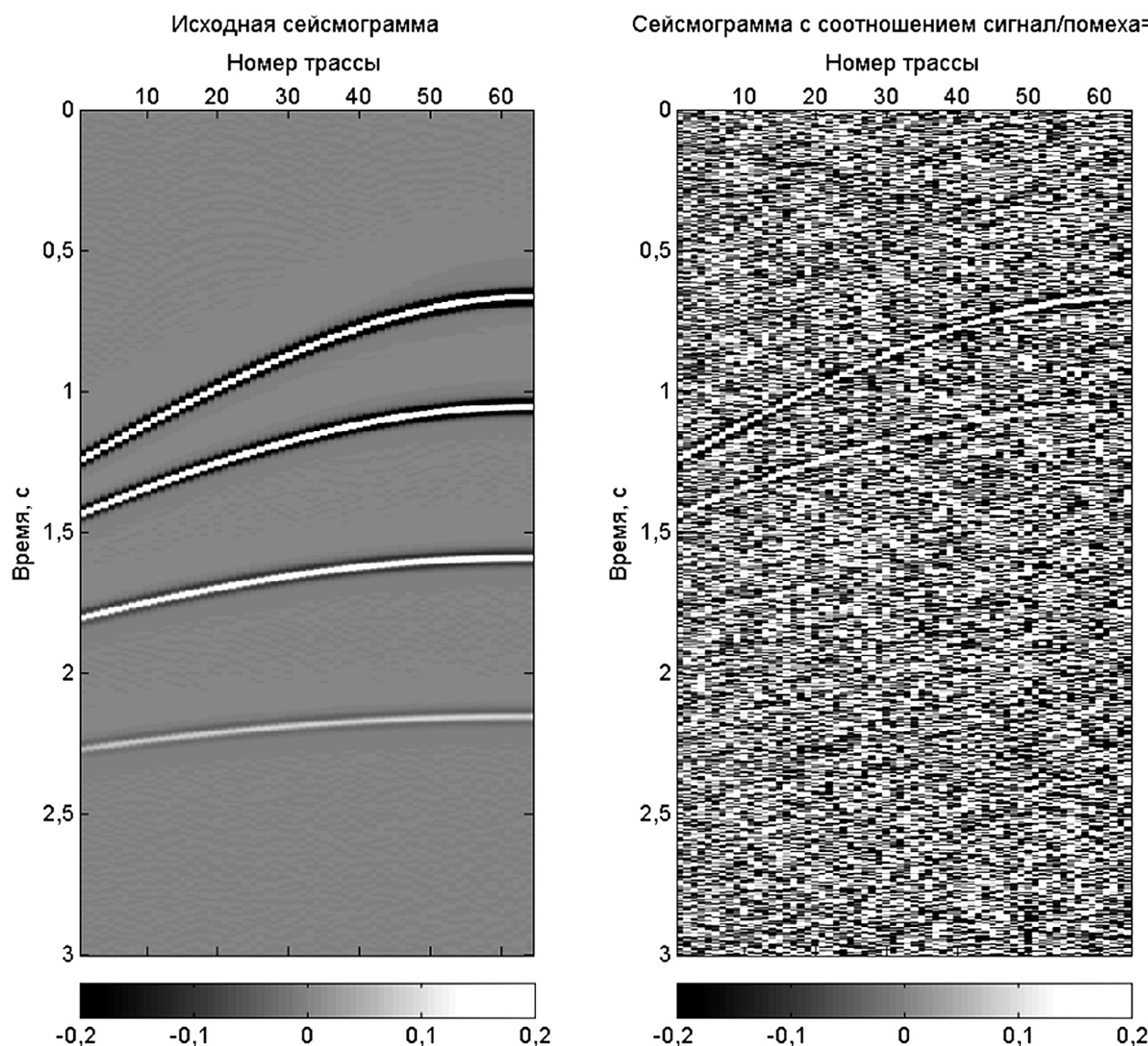


Рис. 1. Примеры сейсмограмм ОПВ с отсутствием случайного шума (слева), с соотношением сигнал/помеха, равным единице (справа)

автокорреляции сигнала [Spencer et al., 1982; Топп, 1991], применялась также методика оценки Q -фактора по вариации центральной частоты сигнала [Zhang, 2008].

Метод спектральных отношений расчета Q (Spectral Ratio method of Q estimation). Распространенный метод оценки Q -фактора — метод спектральных отношений [Spencer et al., 1982]. В том случае, когда в первом и втором слое среды значения добротности равны, с помощью сравнения амплитудных спектров на двух временах прихода однократно отраженных волн t_1 и t_2 соответственно, можно получить отношение двух амплитудных спектров $s(f, t_1)$ и $s(f, t_2)$ следующим образом:

$$\frac{S(f, t_2)}{S(f, t_1)} = \frac{S(f) e^{-\frac{\pi f t_2}{Q}}}{S(f) e^{-\frac{\pi f t_1}{Q}}}, \quad (1)$$

логарифмируя обе стороны выражения, получим:

$$\ln \left[\frac{S(f, t_2)}{S(f, t_1)} \right] = -\frac{\pi(t_2 - t_1)}{Q} f. \quad (2)$$

Обозначив в (2) $\text{Ar} = \ln \left[\frac{S(f, t_2)}{S(f, t_1)} \right]$ как логарифм спектрального отношения и отрисовывая кривую Ar как функцию от частоты f , можно аппроксимировать график этой функции линейным трендом на конечном диапазоне частот (рис. 2). С помощью полученного значения коэффициента наклона аппроксимирующей прямой p значение параметра Q может быть выражено следующим образом:

$$Q = -\frac{\pi(t_2 - t_1)}{p}. \quad (3)$$

Метод оценки добротности среды по сдвигу пиковой частоты (Frequency pick shift method of Q estimation). Эта методика основана на изменении

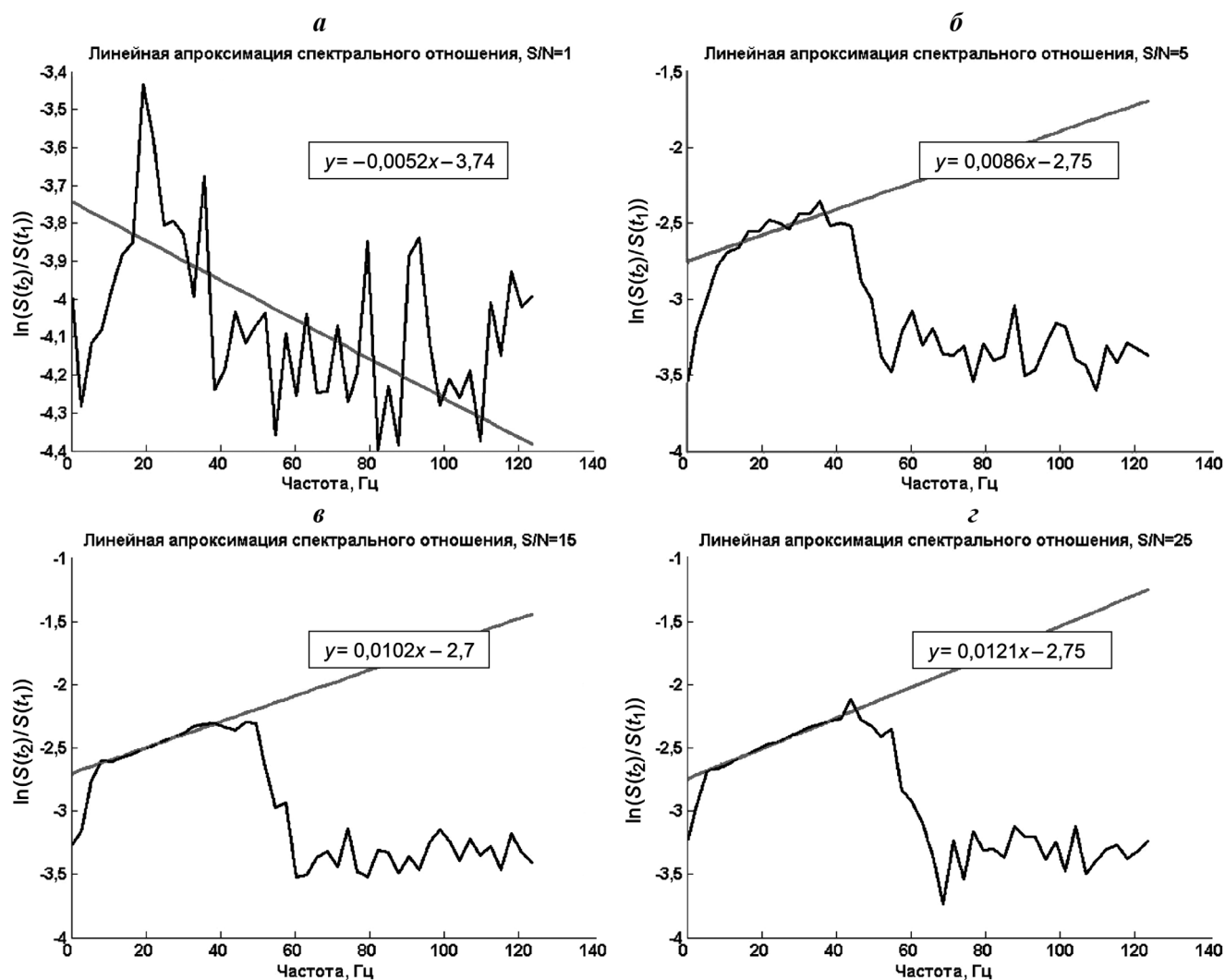


Рис. 2. Графики амплитуд логарифма отношений спектров сигналов, рассчитанных в окнах 525—825 и 900—1200 мс, в зависимости от соотношения сигнал/помеха: а — $S/N=1$; б — $S/N=5$; в — $S/N=15$; г — $S/N=25$

формы сигнала и смещении пиковой частоты в сторону низких частот за счет прохождения в поглощающей среде. При определении связи между Q и сдвигом пиковой частоты предполагается, что амплитудный спектр сигнала источника может быть достаточно хорошо аппроксимирован спектром импульса Рикера. Здесь представлены лишь конечные формулы расчета Q для двух типов спектра сигнала — Рикера (4) и Гауссова спектра дисперсии (5):

$$Q = -\frac{\pi(t_2 - t_1)f_{p2}f_{p1}^2}{2(f_{p1}^2 - f_{p2}^2)}, \quad (4)$$

$$Q = -\frac{\pi\sigma^2(t_2 - t_1)}{f_{p1} - f_{p2}}, \quad (5)$$

где f_{p1} и f_{p2} — пиковые частоты в окне анализа с центрами t_1 и t_2 соответственно, σ^2 — значение дисперсии спектра.

Более подробно описанные методики изложены в работе [Zhang, 2008]. Представленные выше алгоритмы расчета Q -фактора реализованы

автором статьи с помощью языка технических расчетов Matlab.

Для определения, какой из алгоритмов расчета дает более устойчивое решение, в синтетические сейсмограммы добавлялась помеха в виде белого шума так, чтобы максимальное соотношение сигнал/помеха не превышало заданное значение атрибута от 1 до 25. Пример синтетической сейсмограммы ОПВ до и после добавления случайной помехи представлен на рис. 1. В анализе участвовало 25 трасс, окно анализа № 1: 525—825 мс, окно анализа № 2: 900—1200 мс. В результате извлечения импульсов отраженных волн, расчета их амплитудно-частотных характеристик и последующей нормировки и с помощью методик, основанных на спектральных отношениях, были рассчитаны значения фактора добротности среды в зависимости от соотношения сигнал/помеха в диапазоне от 1 до 25 (таблица).

Отношения спектров и их линейные аппроксимации представлены на рис. 2. Отчетливо виден характер зависимости рассчитанных значений Q

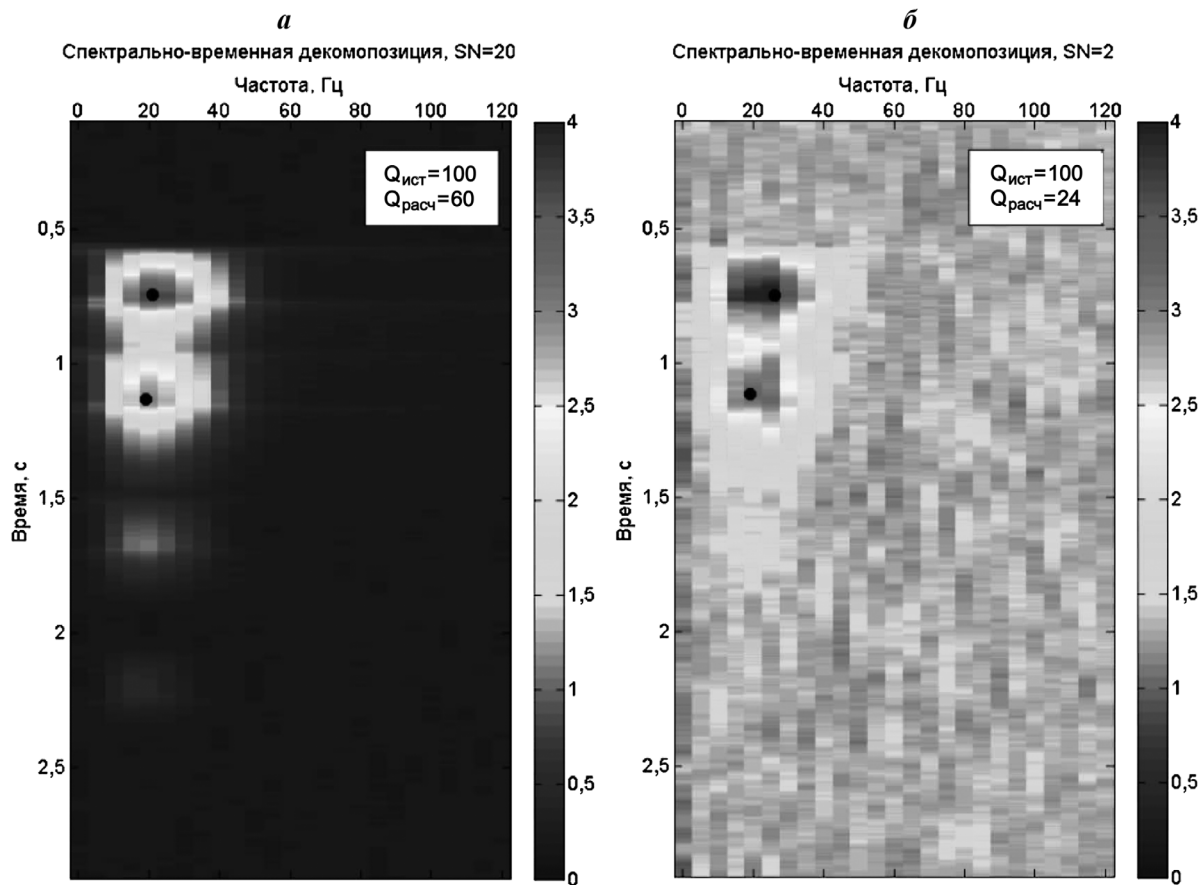


Рис. 3. Частотно-временные спектры записи с отмеченными опорными значениями центральных частот (черные точки на спектре), а также рассчитанные значения Q , полученные с помощью оценки сдвига центральной частоты: a — при $S/N = 20$; b — при $S/N = 2$

от соотношения сигнал/помеха (таблица). В ходе эксперимента были также опробованы вариации алгоритмов оценки Q , основанные на изменении центральной частоты сигнала, а также модификации описанных выше алгоритмов с использованием корреляционного анализа. На рис. 3. представлены спектрально-временные декомпозиции, полученные с помощью преобразования Габора, с длиной оператора 50 мс для двух сейсмограмм ОПВ с соотношением сигнал/помеха, равным 15 и 2 соответственно. Итоговые графики полученных значений Q от соотношения сигнал/помеха представлены на рис. 4.

Рассчитанные значения Q -фактора в зависимости от соотношения S/N с помощью методики спектральных отношений без использования корреляционного анализа

Соотношение S/N	1	2	5	8	10	15	20	25
Теоретическое Q	100	100	100	100	100	100	100	100
Рассчитанное Q	—	—	546	147	139	136	112	126
Ошибка, %	—	—	446	47	39	36	12	26

Таким образом, метод спектрального отношения достаточно прост, однако на практике определение значения Q -фактора осложнено наличием кратных волн и интерференции, что приводит к таким амплитудным спектрам, которые не отра-

жают действительный спектр сигнала. Кроме того, линейный тренд $A_p(f)$ часто весьма неочевиден, и в таких случаях требуется коррекция наблюдаемых значений для приведения описываемой функции к линейному виду. Более сложные спектральные методы оценки могут быть пригодны, если другие факторы (помимо затухания) будут воздействовать на форму сигнала.

Метод расчета Q на основе сдвига пиковой частоты более устойчив к случайным помехам, однако этот метод имеет ряд допущений относительно спектра сигнала, что напрямую влияет на итоговую формулу расчета Q . Вариативность длины окна преобразования Габора также вносит дополнительную степень свободы в оценку Q .

Для оценки амплитудно-частотных характеристик сигнала в оконном режиме следует выбирать диапазон ближних удалений, как до, так и после суммирования. Включение в расчет дальних и средних удалений может в значительной степени исказить результаты из-за большей изменчивости формы сигнала с удалением.

Использование корреляционного анализа позволяет улучшить оценку добротности среды, а оценка характеристик сигнала в большом окне даст более устойчивый результат, хотя и приведет к падению разрешающей способности метода.

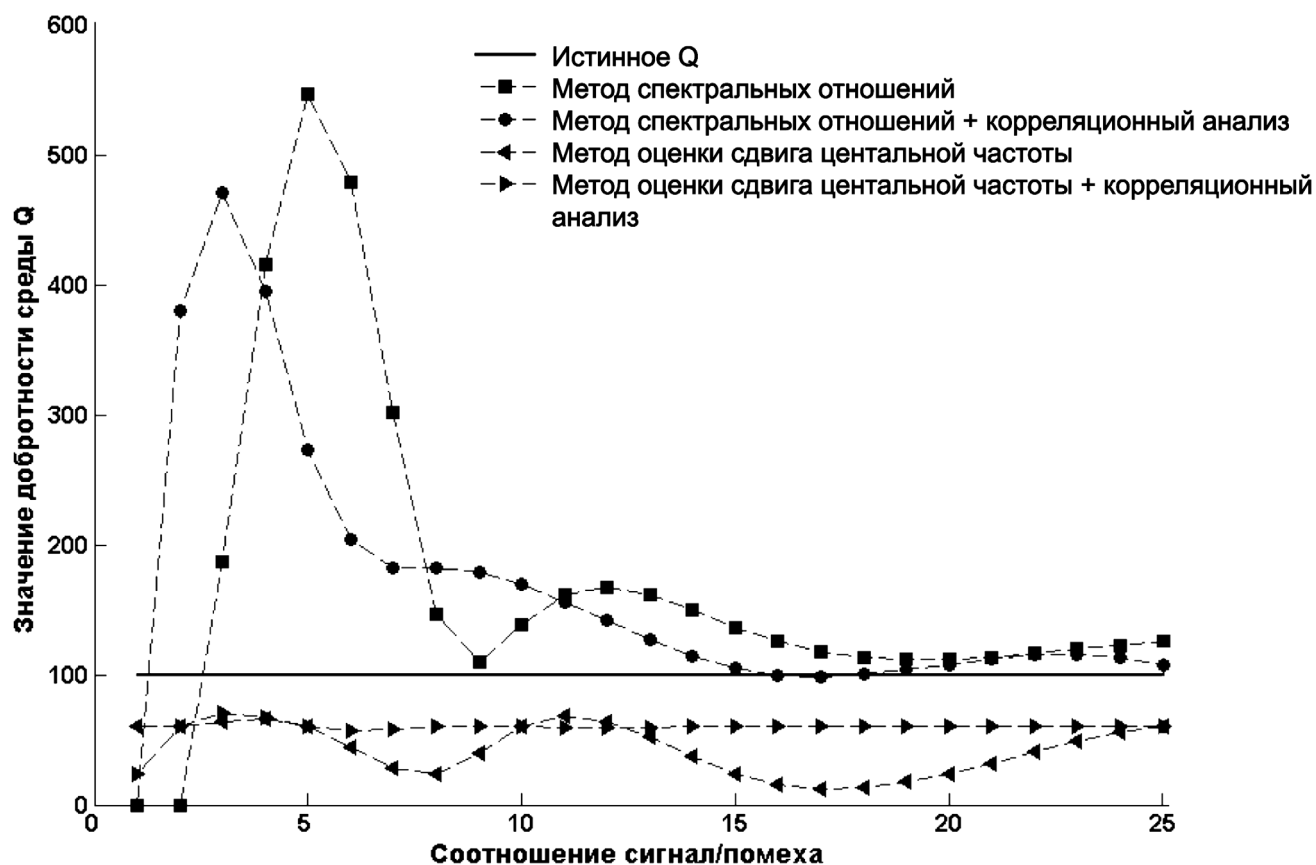


Рис. 4. Графики зависимостей значений Q -фактора от соотношения сигнал/помех. Сплошная линия — истинное значение $Q=100$

Для повышения точности определения значений Q -фактора нужно применять процедуры, увеличивающие соотношение сигнал/помеха на данных до и после суммирования.

Заключение. Изучение влияния соотношения сигнал/помеха на определение фактора добротности среды наглядно показало, что для достоверного определения этого параметра среды необходимо иметь сейсмограммы с высоким значением S/N , в противном случае ошибка может достигать 100% и более. Полученный результат также оправдывает практический подход обработчиков к применению Q -компенсации: высокая погрешность измерений приводит к неверной амплитудной коррекции (часто для наземных данных она не применяется на практике), а изменение фазовой составляющей в зависимости от значений Q минимально. Однако если предположить истинность рассчитанных значений добротности среды, то следует учитывать, что существуют и другие ограничения, связанные с реализацией алгоритма Q -компенсации, а именно с параметрами самого фильтра и его поведением на границе двух сред, что, безусловно, отражается на конечном результате. В современных программных пакетах обработки реализованы методики, основанные на спектральном отношении амплитудно-частотных

характеристик сигнала, а также на анализе сдвига центральной частоты.

По результатам проведенных исследований можно заключить, что алгоритмы, основанные на анализе сдвига центральной частоты, более устойчивы к понижению качества записи, чем при других подходах оценки добротности. Именно на этой методике базируются современные способы оценки Q , включая томографические алгоритмы уточнения этого параметра. На сегодняшний день Q -компенсация активно применяется на этапе до деконволюции. Довольно редко к ней прибегают на этапе привязки сейсмических данных. Дальнейшее использование Q -фактора может быть актуально лишь в случае построения глубинно-скоростной модели и выполнения глубинных алгоритмов миграции до суммирования с использованием параметра Q , таких, как миграции общего угла отражения (Common Reflection Angle Migration, CRAM) при высоком качестве исходных данных. Использование распределения добротности в среде дает возможность выполнить более точный расчет времен пробега в миграции. Несмотря на то что представленная технология — одна из передовых при построении сейсмических изображений, но на практике ее применение в России имеет скорее экспериментальный характер, нежели производственный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авербух А.Г.* Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке. М.: Недра, 1982, 232 с.
- Берзон И.С., Кац С.А., Ратникова Л.И.* Отраженные и проходящие волны для пачек слоев со случайной структурой в квазигомогенной среде // Сейсмические волны в тонкослоистых средах. М.: Наука, 1973. С. 88–108.
- Уайт Д.Е., Михайлова Н.Г., Ляховицкий Ф.М.* Распространение сейсмических волн в слоистых средах, насыщенных жидкостью и газом // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1975. № 10. С. 44–52.
- Carcione J.M., Picotti S.* P-wave seismic attenuation by slow wave diffusion: Effects of inhomogeneous rock properties // *Geophysics*. 2006. Vol. 71. P. O1–O8.
- Dvorkin J., Mavko G., Nur A.* Squirt flow in fully saturated rocks // *Geophysics*. 1995. Vol. 60. P. 97–107.
- Kjartansson E.* Constant Q wave propagation and attenuation // *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84. P. 4737–4748.
- O'Doherty R.F., Anstey N.A.* Reflections on amplitudes // *Geophysical Prospecting*. 1971. Vol. 19. P. 430–458.
- Pride S.R., Berryman J.G., Harris J.M.* Seismic attenuation due to wave induced flow // *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. B01201.
- Richards P.G., Menke W.* The apparent attenuation of a scattering medium // *Bullet. Seismol. Soc. Amer.* 1983. Vol. 73. P. 1005–1021.
- Ricker N.* The form and laws of propagation of seismic wavelets // *Geophysics*. 1953. Vol. 18. P. 10–40.
- Sato H., Fehler M.C.* Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous Earth. N.Y.: Springer-Verlag, 1998.
- Spencer T.W., Sonnad J.R., Butler T.M.* Seismic Q-stratigraphy or dissipation // *Geophysics*. 1982. Vol. 47. P. 16–24.
- Tonn R.* The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: A comparison of different computational methods // *Geophys. Prosp.* 1991. Vol. 39. P. 1–27.
- Zhang C.* Seismic Absorption Estimation and Compensation // Master thesis, The University of British Columbia (Vancouver), 2008.

Поступила в редакцию 10.12.2018

Поступила с доработки 27.02.2019

Принята к публикации 27.02.2019