

УДК 550.834.05

А.С. Пирогова¹

РАЗДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫХ ЭФФЕКТОВ РАССЕЯНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПОСРЕДСТВОМ СОВМЕСТНОЙ ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ВСП И СКВАЖИННЫХ КАРОТАЖЕЙ

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

Университет Кертин, ул. Кент, Бентли, Западная Австралия, 6102, Австралия

Curtin University, Kent St., Bentley WA 6102, Australia

Описан подход к оценке параметров частотно-зависимого затухания сейсмических волн, распространяющихся в земной коре. Предлагаемый подход основан на инверсии волновых форм, зарегистрированных посредством продольного вертикального сейсмического профилирования (ВСП) в скважине. За счет дополнительного привлечения данных высокоразрешающих скважинных каротажей (акустический и плотностной каротажи) для решения прямой задачи инверсии предлагаемый подход позволяет разделить эффекты неупругого поглощения и частотно-зависимого рассеяния волн на тонкослоистой пачке.

Ключевые слова: сейсморазведка, вертикальное сейсмического профилирование (ВСП), затухание, рассеяние, добротность.

The paper presents an approach to estimation of frequency-dependent attenuation of seismic waves propagating in the earth subsurface. The approach is based on the waveform inversion of vertical seismic profiling data acquired in a borehole. Incorporation of well log data (in particular, sonic and density logs) in the forward modelling routine allows for separation of two factors that cause frequency-dependent seismic attenuation. In particular, the inversion facilitates separation of 1D scattering versus inelastic absorption in the horizontally layered subsurface.

Key words: seismic exploration, vertical seismic profiling (VSP), attenuation, scattering, quality-factor.

Введение. Сейсмические волны при распространении в земле испытывают частотно-зависимое затухание из-за неупругого поглощения энергии (переход энергии волнового процесса в тепло из-за внутреннего трения) и геометрического рассеяния на микронеоднородностях среды [Toksoz, Johnston, 1981; Кондратьев, 1986; Ампилов, 1992]. Оба явления приводят к ухудшению качества сейсмического изображения, а именно проявляются в потере интенсивности сейсмического сигнала с глубиной, ухудшении разрешающей способности записи, а также в искажении фазового спектра сигналов.

Описание процессов, вызывающих частотно-зависимое затухание волн в горных породах, необходимо в первую очередь для компенсации эффектов затухания и повышения качества структурных построений и предсказания моделей упругих свойств среды, выполняемых на основе данных сейсморазведки [Денисов и др., 1999; Wang, 2009]. Кроме того, количественное описание частотно-зависимых процессов в породах можно привлекать для получения дополнительной информации о их строении и свойствах. Так, например, совместный анализ значений скорости P - и S -волн вместе с оценками добротности Q_p и Q_s , характеризующи-

ми неупругое поглощение этих волн, в некоторых случаях позволяет разбраковать геологические резервуары по типу насыщающего флюида вода–газ–нефть. В работе [Klimentos, 1995] показано, как на кросс-плотах зависимости V_p/V_s от Q_p/Q_s наблюдается разделение интервалов разреза с соответствующими типами порового насыщения. По данным многих лабораторных экспериментов в терригенных породах наблюдается корреляция неупругого поглощения сейсмической энергии со степенью и типом их насыщения [Johnston et al., 1979], а также с проницаемостью [Pride et al., 2003]. В то же время существуют работы, где предлагается использовать параметры упругого рассеяния волн для изучения порового пространства [Гик, Конторович, 2010] и трещиноватости среды, а именно размера и ориентации трещин [Main et al., 1990].

Разделение частотно-зависимых эффектов неупругого поглощения и упругого рассеяния по сейсмическим данным — нетривиальная задача, которая практически никогда не решается в сейсморазведке. Вместо этого принято оценивать эффективный параметр $Q_{эфф}$, который описывает наблюдаемое изменение частотного состава сигнала с глубиной, обусловленное как упругим рассея-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики; Университет Кертин, Горная школа Западной Австралии, отделение разведочной геофизики; аспирантка; e-mail: anastasya.pir@gmail.com

нием волн, так и неупругим поглощением энергии: $1/Q_{эф} = 1/Q_{упр} + 1/Q_{неупр}$ [Spencer et al., 1977].

В статье предлагается подход к оценке неупругого поглощения сейсмических волн $1/Q_{неупр}$ в горизонтальнослоистых средах. Подход основан на инверсии волновых форм данных вертикально сейсмического профилирования (ВСП) в скважине [Гальперин, 1982]. Особенность подхода, позволяющая разделить эффекты рассеяния и поглощения в среде, заключается в привлечении данных высокоразрешающих скважинных каротажей (дециметровое разрешение по глубине) для моделирования полного волнового пакета. За счет такого моделирования в синтетическом поле в явном виде воспроизводятся эффекты частотно-зависимого рассеяния волн на тонкослоистых пачках слоев [O'Doherty, Anstey, 1971; Кондратьев, 1976]. Таким образом, все дополнительные частотно-зависимые изменения сигнала, наблюдаемые в волновом поле, объясняются неупругим поглощением в среде и оцениваются при инверсии. В статье описан алгоритм инверсии, приведена теоретическая модель неупругого поглощения, используемая для решения прямой задачи. Демонстрация успешного применения метода для оценки частотно-зависимого поглощения приведена на модельных данных.

Материалы и методы исследований. Для горизонтальнослоистых (1D) сред расчет поля может быть выполнен посредством метода матричного пропагатора плоских волн, устойчиво работающего на небольших углах падения [Kennett, 1985]. Для задания пропагатора в поглощающем слое необходимо определить закон падения амплитуды A с расстоянием r :

$$A = A_0 \exp(-\alpha(\omega)r), \quad (1)$$

где A_0 — начальная амплитуда плоской волны, $\alpha(\omega) = \omega/\beta = \pi f/c(\omega)Q(\omega)$ — коэффициент затухания, ω — круговая частота, $c(\omega)$ — фазовая скорость, $Q(\omega)$ — добротность или мера потери энергии за один цикл колебаний [Aki, Richards, 1980]. В сейсмическом диапазоне (5–150 Гц) для описания частотной зависимости затухания $\alpha(\omega)$ наиболее часто используется закон, близкий к линейному, т.е. считается, что добротность Q — постоянная величина для каждой частоты в заданном диапазоне. Такая модель поглощения предполагает логарифмический закон дисперсии скорости $c(\omega)$ [Aki, Richards, 1980]:

$$\frac{c(\omega_1)}{c(\omega_2)} = 1 + \frac{1}{\pi Q} \ln\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right). \quad (2)$$

Матрица пропагатора плоских волн для расчета передаточной функции слоистой диссипативной среды $H(\omega)$, поглощение в каждом слое которой задано через добротность $Q_{неупр}$ по модели (1) и (2), приводится в работе [Ganley, 1981]. Значения скоростей P -волн, плотности и мощности тонких

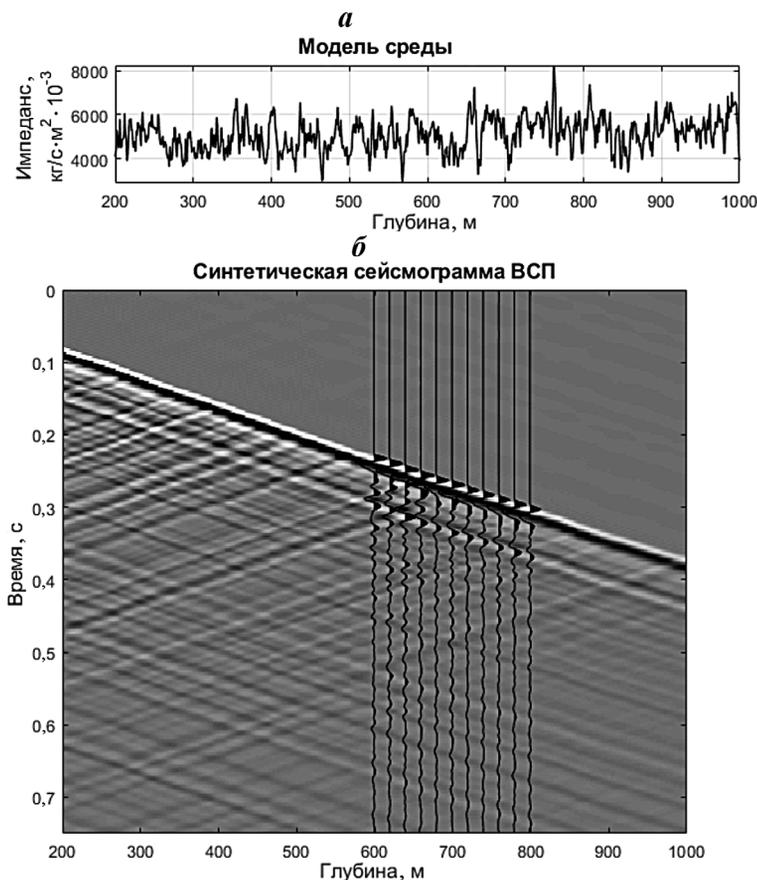
слоев для расчета $H(\omega)$ предлагается задавать с учетом измерений акустического и плотностного каротажей в скважине и закона дисперсии (2). Волновое поле $S_k(\omega)$, зарегистрированное k -приемниками в скважине, рассчитывается в спектральной области с учетом передаточной функции среды $H_k(\omega)$, функции источника $S_0(\omega)$ и геометрического расхождения фронта D :

$$S_k(\omega) = S_0(\omega) \cdot H_k(\omega) \cdot D. \quad (3)$$

Параметры поглощения $Q_{неупр}$ определяются посредством минимизации в смысле наименьших квадратов невязки между наблюдаемым и модельным полем.

Синтетический эксперимент. Для демонстрации работы метода была создана слоистая модель с известной функцией рассеяния, описываемая частотно-зависимой добротностью $Q_{упр}(\omega)$ согласно теоретической модели для случайных слоистых сред, предложенной в работе [Shapiro et al., 1994]. Акустическая модель среды и соответствующая ей функция $Q_{упр}(\omega)$ представлены на рисунке (а, в). Неупругое поглощение задавалось для каждого слоя постоянной частотно-независимой величиной $Q_{неупр}$, равной 60. Эффективное затухание в такой модели описывается функцией $Q_{эф}(\omega)$, представленной на рисунке, в. Синтетическое волновое поле, рассчитанное методом матричного пропагатора для геометрии съемки продольного ВСП в вертикальной скважине с точечным источником колебаний и интервалом между приемниками 10 м, представлено на рисунке, б.

Синтетические данные также были зашумлены случайным шумом (нормально распределенным) с максимальной амплитудой шума 10% от средней амплитуды полезного сигнала. В рамках инверсии подбор волнового поля осуществлялся на интервале разреза 600–800 м во временном коридоре вблизи первых вступлений (рисунок, б). Помимо оптимизационного определения параметров затухания в процессе инверсии также уточнялась функция источника. Начальная оценка импульса S_0 (функция источника) выбиралась как первая трасса в указанном интервале на сейсмограмме ВСП. Инверсия проводилась в два этапа. В рамках первого этапа прямая задача инверсии решалась для толстослоистой модели на базе осреднения >10 м для оценки эффективного затухания $Q_{эф}$. Осуществлялся подбор постоянного значения $Q_{эф}$ во всем диапазоне частот. Для оценки влияния базы осреднения на оценку $Q_{эф}$ был выполнен тест с базами 10, 15 и 50 м соответственно. На втором этапе моделирование поля уже проводилось для тонкослоистой модели (на базе 1 м) для учета эффектов рассеяния в слоистой среде и определения, соответственно, неупругого поглощения $Q_{неупр}$. Параметр рассеяния $Q_{упр}$ можно оценить по инвертированным значениям из выражения $1/Q_{эф} = 1/Q_{упр} + 1/Q_{неупр}$.



Акустическая модель слоистой среды (мощность слоя 1 м) (а); синтетическая трасса ВСП, методом отклонений показаны трассы, используемые для инверсии в интервале 600–800 м (б); модельные (сплошная линия) и рассчитанные значения параметров затухания (пунктир) в интервале (в)

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты определения $Q_{\text{эф}}$, $Q_{\text{неупр}}$ и $Q_{\text{упр}}$, а также результат подбора функции источника в процессе инверсии представлены на рисунке, в. Величина ошибки определения $Q_{\text{эф}} = 34 \pm 2$, связанная с выбранной базой осреднения, составляет около 6%. Также отметим, что в предложенном эксперименте осуществлялся подбор постоянного значения $Q_{\text{эф}}$ во всем диапазоне частот, которое в результате соответствует максимуму функции рассеяния на характеристической частоте 110 Гц (рисунок, в). Параметр неупругого затухания определяется с высокой точностью $Q_{\text{неупр}} = 60 \pm 2$.

Заключение. Предложен инверсионный подход для оценки частотно-зависимого затухания сейсмических волн по данным ВСП. Привлечение данных акустического и плотностного скважинных каротажей позволяет смоделировать в явном

виде эффекты частотно-зависимого упругого рассеяния волн в слоистых средах без каких-либо предположений о статистическом распределении вертикальных неоднородностей в такой среде. Инверсия волновых форм, основанная на таком моделировании, позволяет подобрать модель параметров, характеризующих неупругое поглощение в среде.

Благодарности. Автор выражает благодарность своим научным руководителям Б.Я. Гуревичу, Р.Л. Певзнеру и Н.В. Шалаевой за ценные консультации и научное сопровождение работы.

Финансирование. Работа выполнена при стипендиальной поддержке университета Кертин (Curtin University), фонда CO2CRC и Консорциума геофизиков-разведчиков университета Кертин (Curtin Reservoir Geophysicists Consortium — CRGC).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ампилов Ю.П. Поглощение и рассеяние сейсмических волн в неоднородных средах. М.: Недра, 1992.
- Гальперин Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирование. М.: Недра, 1982.
- Гук Л.Д., Конторович В.А. Механизм затухания сейсмических волн в пористых средах // Гео-Сибирь. 2010. № 2 (1). С. 107–111.
- Денисов М.С., Оберемченко Д.М., Фиников Д.Б. Амплитудная деконволюция сейсмических записей с учетом частотно-зависимого поглощения // Геофизика. 1999. № 4. С. 25–29.

- Кондратьев О.К. Отраженные волны в тонкослоистых средах. М.: Наука, 1976.
- Кондратьев О.К. Сейсмические волны в поглощающих средах. М.: Недра, 1986.
- Aki K., Richards P.G. Quantitative seismology: theory and methods. W.H. Freeman & Co. 1980. Vol. 1.
- Ganley D.C. A method for calculating synthetic seismograms which include the effects of absorption and dispersion // Geophysics. 1981. Vol. 46, N 8. P. 1100–1107.
- Johnston D.H., Toksöz M.N., Timur A. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: II. Mechanisms // Geophysics. 1979. Vol. 44, N 4. P. 691–711.

Kennett B.L.N. Seismic wave propagation in stratified media. Cambridge University Press, 1985.

Klimentos T. Attenuation of P- and S-waves as a method of distinguishing gas and condensate from oil and water // *Geophysics*. 1995. Vol. 60, N 2. P. 447–458.

Main I.G., Peacock S., Meredith P.G. Scattering attenuation and the fractal geometry of fracture systems // *Pure and Applied Geophysics*. 1990. Vol. 133, N 2. P. 283–304.

O'Doherty R.F., Anstey N.A. Reflections on amplitudes // *Geophys. Prospecting*. 1971. Vol. 19, N 3. P. 430–458.

Pride S.R., Harris J.M., Johnson D.L. et al. Permeability dependence of seismic amplitudes // *The Leading Edge*. 2003. Vol. 22, N 6. P. 518–525.

Shapiro S.A., Zien H., Hubral P. A generalized O'Doherty-Anstey formula for waves in finely layered media // *Geophysics*. 1994. Vol. 59, N 11. P. 1750–1762.

Spencer T.W., Edwards C.M., Sonnad J.R. Seismic wave attenuation in nonresolvable cyclic stratification // *Geophysics*. 1977. Vol. 42, N 5. P. 939–949.

Toksoz M.N., Johnston D.H. Seismic wave attenuation. Tulsa: Soc. Exp. Geophys. 1981.

Wang Y. Seismic inverse Q filtering. John Wiley & Sons, 2009.

Поступила в редакцию 09.04.2019

Поступила с доработки 25.04.2019

Принята к публикации 19.09.2019