**А.А. Фонин, С.Г. Сучков, С.И. Михеев,
В.А. Николаевцев, Д.С. Сучков**

НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов,
ул. Астраханская, 83, E-mail: fonin.a@mail.ru*

Описан новый метод определения акустических параметров геологической структуры на основе корреляционной обработки акустических сигналов, принятых разнесенными по вертикали приемниками. Предложен метод расчета акустических параметров слоев (скорости, плотности, добротности) для сред с наклонными и неровными границами раздела. Новизна метода состоит в использовании двух расположенных на разных уровнях сейсмоприемников. Один из них помещается на поверхности, второй – на определенной глубине. Путем корреляционной обработки совмещенных во времени сейсмограмм выделяются сигналы, пришедшие по вертикали, на которой расположены приемники. Минимизация целевой функции в виде суммы квадратов разностей расчетной и измеренных сейсмограмм позволяет определить все акустические параметры вертикального разреза слоистой геологической среды для разных глубин, что позволяет дать объективный прогноз строения и свойств разреза перед глубоким бурением в месте проведения сейсмических наблюдений предложенным методом.

Ключевые слова: сейсморазведка, прогноз свойств разреза перед бурением, корреляционная обработка акустических сигналов, акустические параметры пород

Введение. В настоящее время в сейсморазведке применяется множество методов и технологий, основанных на различных физических принципах. По мнению многих авторов, развитие сейсморазведки связано с внедрением новых достижений физики и коренным изменением методики исследований (Николаев, 2014; Табаков и др., 2014).

В настоящей работе предлагается новый метод определения акустических параметров геологического разреза по вертикали, заданной двумя приемниками. Этот метод может найти широкое применение в

геофизических исследованиях и сейсморазведке. Его преимуществом является высокая точность прогноза глубины залегания слоев в разрезе, скорости и затухания в них энергии сейсмических волн, плотности пород в точке предполагаемого бурения скважины.

Описание метода. Метод основан на применении принципиально новой схемы, в которой двумя независимыми, разнесенными по вертикали, приемниками регистрируются две сейсмограммы. Сейсмоприемники могут располагаться на одной вертикали как в неглубокой скважине на суше, так и в водной среде.

Расстояние между приемниками определяется условием достаточного для корреляционной обработки временного разделения сигналов в приемниках и должно быть $H > V_{\text{ак}} \cdot t_{\text{имп}}$, где $V_{\text{ак}}$ – скорость продольной акустической волны в среде между приемниками, $t_{\text{имп}}$ – длительность сейсмического импульса. При использовании данного способа сейсморазведки на поверхности земли глубина размещения датчика в скважине может составлять 30–50 м и более и должна превышать глубину подошвы зоны малых скоростей. В морской сейсморазведке необходима глубина размещения донного датчика не менее 15–30 м в зависимости от длительности сейсмоимпульса. На рис.1 представлены схемы реализации предлагаемого метода при морской (а) и наземной (б) сейсморазведке. Штрихпунктирными линиями показаны фронты распространения сейсмического

Рис. 1. Схема реализации предлагаемого способа на примере морской (а) и наземной (б) сейсморазведки. Пр1 –приемник верхний, Пр2– приемник нижний (донный), τ_0 –время распространения акустического сигнала между Пр1 и Пр2, τ –время распространения сигнала между Пр1 и Пр2 для неперпендикулярных импульсов, H – расстояние между Пр1 и Пр2, z_r – расстояние от Пр2 до первой границы (зона малых скоростей), h_i – глубины залегания границ i -ых слоев, d_i – толщины i -ых слоев.

сигнала от источника возбуждения. При отражении сейсмического сигнала от границ слоев происходит его рассеяние на неровностях поверхности, поэтому на рисунке штриховыми линиями показаны диаграммы направленности рассеяния акустического сигнала.

Для предлагаемого способа сейсморазведки в точке предполагаемого бурения требуется источник сейсмического импульса с длительностью не более 10 мсек, например, электродинамическая установка, взрыв, пневмопушка и т. п. Для приема отраженных сейсмических сигналов требуются высокочувствительные сейсмоприемники продольной акустической волны.

При локальном возбуждении на поверхности упругой многослойной среды импульсного сейсмосигнала возникает сферическая продольная объемная акустическая волна, распространяющаяся вглубь разреза. На границах слоев, вследствие скачка акустического импеданса, происходит отражение (с рассеянием) и преломление акустических волн. При обработке предложенным методом происходит выделение только тех сигналов, которые распространяются из глубины по вертикали, заданной приемниками.

Приемники используются для измерения амплитуды и формы сейсмоимпульса, прошедшего геологическую структуру, и регистрации сейсмограммы, отраженных от границ раздела слоев импульсов.

Для исследования прохождения импульса в многослойной толще с количеством слоев от 10 и больше нет необходимости рассматривать все возможные отражения и переотражения во всей моделируемой структуре. Как показывают расчеты, достаточно анализировать эти процессы в системе 2–3 м слоев и переходить к следующим слоям, считая входным сигналом импульс, вышедший из предыдущих слоев. Такое приближение не учитывает трех- и более кратные переотражения, но они имеют амплитуду на несколько порядков ниже амплитуды основного сигнала и не оказывают существенного влияния на его амплитуду и форму.

В качестве базовой системы рассмотрим три слоя с тремя поверхностями раздела на упругом полупространстве, моделирующем более глубокие слои геологической структуры, рассматриваемые на следующих итерациях (рис. 2). Пусть на поверхности земли тем или иным способом происходит возбуждение сейсмоимпульса. Форма и амплитуда импульса измеряется вторым приемником Пр2, находящимся на некоторой глубине. Место расположения этого приемника считаем входом в моделируемую многослойную систему. Таким образом, на входе нужно задать форму и амплитуду сейсмоимпульса. Для примера выбрано аналитическое представление вида:

Рис. 2. Схема построения алгоритма.

Рис. 3. Типичная форма импульсного зондирующего сигнала.

Для выделения отраженных сигналов, приходящих к приемникам по заданной ими вертикали, сравниваются сейсмограммы верхнего и нижнего приемников. Один и тот же сигнал, приходящий на приемники по вертикали, создает на сейсмограммах отклик, смещенный по времени на интервал времени прохождения сейсмосигнала между приемниками (τ_0). Время τ_0 измеряется с высокой точностью по отметкам прихода возбуждающего импульса на оба приемника с учетом взаимного расположения источника и приемников. Для любых принятых неперпендикулярных сигналов разница времен между соответствующими отражению от одних границ откликами (локальными максимумами амплитуды) будет отлична от τ_0 .

Наглядно фильтрацию вертикально приходящих сигналов можно осуществить при совмещении сейсмограмм нижнего и верхнего приемников. При этом совпадающие локальные максимумы нужно сохранить, а несовпадающие – исключить. Полученный в результате этой операции дискретный сигнал описывает отраженные сигналы, пришедшие на приемники по вертикали. Для точных расчетов нужно вычислить корреляционную функцию, которая будет иметь локальные максимумы для сигналов, пришедших по вертикали, а для неперпендикулярных сигналов корреляционная функция будет мала. Вид корреляционной функции представлен следующей формулой:

$$S(t) = \int_{t_1}^{t_2} S_u(t' - \tau_0) S_d(t - t') dt', \quad (1)$$

где S_u – сейсмограмма верхнего приемника, S_d – сейсмограмма нижнего приемника, интервал времени (t_1, t_2) выбирается исходя из количества одновременно анализируемых слоев на каждой итерации метода, предполагающего анализ многослойной структуры последовательно по два или три слоя. Таким образом, корреляционная функция $S(t)$ идентифицирует сигналы, пришедшие по вертикали, и ее максимумы используются для построения метода расчета акустических параметров геологической структуры на основе поиска глобального минимума.

Для получения расчетной сейсмограммы построена аналитическая модель прохождения плоской продольной акустической волны по вертикали через слоистую структуру с наклонными и рассеивающими границами с вычислением отраженных от всех границ волнами, распространяющимися к приемникам по заданной ими вертикали.

Каждая волна из бесконечного количества плоских волн, описывающих импульс, на границах слоев частично отражается и частично проходит в следующий слой. Коэффициент отражения от n -ой идеальной плоской границы определяется формулой: $R_n = \frac{Z_{n+1} - Z_n}{Z_{n+1} + Z_n}$, где $Z_n = \rho_n c_n$ – акустический импеданс n -го слоя. Но идеальных поверхностей в природе не существует и, кроме того, поверхность в точке отражения, как правило, не горизонтальна. Поэтому отраженный сигнал рассеивается с некоторой диаграммой направленности, зависящей от угла наклона границы раздела и ее шероховатости, как показано на рис. 1 штриховыми линиями в виде овалов. С учетом этого необходимо ввести коэффициент рассеяния n -ой границы $a_n < 1$, который определяет амплитуду отраженного сигнала по вертикали. Тогда эффективный коэффициент отражения: $V_n = a_n \cdot R_n$, а эффективный коэффициент прохождения: $W_n = a_n \cdot (1 - R_n) = a_n - V_n$.

На основе расчетного временного отклика слоистой структуры и корреляционной функции (1) строится целевая функция в виде суммы квадратов разностей измеренных значений максимумов амплитуд и расчетных значений, зависящих от всех указанных акустических характеристик слоистой геологической структуры, которая строится для двух–трех слоев для упрощения расчетов на вычислительных машинах.

Целевая функция для двух слоев и трех границ зависит от следующих 14 варьируемых параметров:

$$F(V_1, V_2, V_3, W_{23}, W_{12}, t_2, t_3, t_r, z_r, d_2, d_3, Q_1, Q_2, Q_3) = \sum_{i=1}^{N_i} \left(P_r^{(i)} - S_{\text{exp}}^{(i)} \right)^2, \quad (2)$$

где $P_r^{(i)}$ – расчетные значения максимумов корреляционной функции в моменты времени T_r , которых учитывается N_r штук, $S_{\text{exp}}^{(i)}$ – экспериментальные значения максимумов сейсмограммы в эти же моменты времени, V_i – коэффициенты отражения от соответствующих границ в вертикальном направлении, W_{ij} – коэффициенты прохождения из среды i в среду j , Q_i – добротность i -ой среды, t_2 , t_3 – времена двукратного прохождения сред 2 и 3, t_r – время двукратного прохождения волны от приемника до ближайшей снизу границы, а при продвижении к более глубоким слоям структуры t_r соответствует двукратному прохождению верхнего из рассматриваемых слоев.

Глобальный минимум целевой функции (2) достигается при таком наборе значений четырнадцати указанных параметров, при которых расчетная сейсмограмма наиболее близка к экспериментальной (корреляционной функции). После определения всех акустических параметров, глубин и толщин первых двух слоев, имея полную амплитудно-временную информацию об импульсе, прошедшем эти слои, задача повторяется для следующих в глубину двух слоев, пока не будет достигнута требуемая глубина. Таким образом, определяются все параметры многослойной структуры до требуемой глубины.

Найденные значения варьируемых параметров для всех слоев позволяют определить все искомые параметры: h_i – глубины залегания границ слоев, c_i – скорости звука в слоях, ρ_i – плотности слоев и α_i – коэффициенты затухания звука в слоях. При этом определяются и параметры рассеяния a_i на каждой границе, характеризующие как ее шероховатость, так и наклон.

Заключение. В настоящей статье был рассмотрен принципиально новый метод определения глубин залегания слоев геологического разреза и распределения акустических параметров пород по вертикали в точке предполагаемого бурения. Метод отличается более высокой, чем известные методы, достоверностью прогноза залегания нефтегазонасыщенных пластов. Для реализации метода не требуется сложное оборудование и аппаратура. Вместе с тем, необходимо наличие быстродействующей многопроцессорной вычислительной системы. Предложенный метод может применяться для исследования характеристик пород как при наземной, так и в морской сейсморазведке, в том числе при разработке нефтяных и газовых месторождений. Важно отметить, что предлагаемым методом может быть также решен ряд актуальных проблем, которые обсуждаются в работах (Николаев, 2014; Табаков и др., 2014; Кузнецов и др., 2018; Рабинович и др., 2018).

Литература

1. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Арутюнов С.И., Ризанов Е.Г., Дыбленко В.П., Дрягин В.В. Сейсмические исследования неравномерности открытой трещиноватости и неоднородности флюидонасыщения геологической среды для оптимального освоения месторождений нефти и газа // Георесурсы. 2018. № 3. С. 206–215.
2. Николаев А.В. Сейсморазведка: вчера, сегодня, завтра // Экспозиция «Нефть Газ». 2014. № 6 (38). С. 32–36.
3. Рабинович Е.В., Вайнмастер П.И., Шефель Г.С. Устранение избыточности данных сейсмического мониторинга гидроразрыва пласта // МСМ. 2018. № 1 (45). С. 81–94.
4. Табаков А.А., Ференци В.Н., Калван Л.В., Степченков Ю.А., Колосов А.С. Сейсморазведка высокой четкости (СВЧ) – бескомпромиссный подход к регистрации и обработке сейсмических данных // Экспозиция «Нефть Газ». 2014. № 2 (34). С. 27–30.

**A.A. Fonin, S.G. Suchkov, S.I. Mikheev,
V.A. Nikolaevtsev, D.S. Suchkov**

NEW METHOD OF GEOLOGICAL PROFILE ACOUSTIC PARAMETERS DETERMINATION

*Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky,
Russia, 410012, Saratov, st. Astrakhanskaya, 83, E-mail: fonin.a@mail.ru*

The new method of the geological structure acoustic parameters determination based on the correlation processing of acoustic signals from the vertically located receivers is described. The method of the layers acoustic parameters (velocity, density, quality factor) calculation for the media with inclined and irregular interfaces is proposed. The novelty of the method is using of two vertically arranged seismic pulse detectors – one surface receiver and one deepened receiver. They receive acoustic waves, which are reflected from the boundaries of the layers. Correlation processing of two time-combined seismograms makes it possible to isolate signals, which propagate along the vertical line on which the receivers are located. Minimization of the objective function in the form of the sum of squares of the differences between the calculated and measured seismograms allows us to determine all the acoustic parameters of the vertical profile of the layered geological structure for the different depths, which should all owus to give an objective forecast before drilling at the location of this profile.

Keywords: seismic exploration, preliminary forecast before drilling, correlation processing of acoustic signals, acoustic parameters of a geological profile

References

1. Kuznetsov O.L., Chirkin I.A., Arutyunov S.I., Rizanov Ye.G., Dyblenko V.P., and Dryagin V.V. Seismicheskiye issledovaniya neravnomernosti otkrytoy treshchinovatosti i neodnorodnosti flyuidonasyshcheniya geologicheskoy sredy dlya optimal'nogo osvoyeniya mestorozhdeniy nefti i gaza (Seismic studies of the unevenness of open fracturing and heterogeneity of fluid saturation of the geological environment for the optimal development of oil and gas fields). *Georesursy*, 2018, Vol. 3, pp. 206–215.
2. Nikolayev A.V. Seysmorazvedka: vchera, segodnya, zavtra (Seismic exploration: yesterday, today, tomorrow). *Ekspozitsiya Neft' Gaz*, 2014, Vol. 6, No. 38, pp. 32–36.
3. Rabinovich Ye.V., Vaynmaster P.I., and Shefel' G.S. Ustraneniye izbytochnost dannykh seysmicheskogo monitoring gidrorazryva plasta (Elimination of redundancy of seismic monitoring of hydraulic fracturing). *MSiM*, 2018, Vol. 1, No. 45, pp. 81–94.
4. Tabakov A.A., Ferentsi V.N., Kalvan L.V., Stepchenkov YU.A., and Kolosov A.S. Seysmorazvedka vysokoy chetkosti (SVCH) – beskompromissnyy podkhod k registratsii obrabotke seysmicheskikh dannykh (High Definition Seismic (UHF) – an uncompromising approach to recording and processing seismic data). *Ekspozitsiya Neft' Gaz*, 2014, Vol. 2, No. 34, pp. 27–30.