



СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ AVO И ДАННЫХ СКВАЖИННОЙ ГРАВИМЕТРИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ УПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ

А.Н. Василевский^{1,2}, Ю.А. Дашевский^{1,2,3}, С.В. Яскевич^{1,4}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,

³Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 6,
630090, Новосибирск, Россия.

⁴Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128,
e-mail: VasilevskiyAN@jggg.sbras.ru

Анализируется как использование дополнительной информации в виде гравиметрических измерений в скважине при оценке упругих импедансов в рамках AVO-анализа влияет на точность определения параметров среды. Показана возможность увеличения точности результатов сейсморазведки в процедуре определения упругих параметров за счет использования данных скважинной гравиметрии.

Скважинная гравиметрия, AVO-анализ, упругие импедансы, комплексирование сейсмических и гравиметрических методов

JOINT ANALYSIS OF AVO AND BOREHOLE GRAVIMETRY DATA TO IMPROVE THE RESOLUTION IN DETERMINING THE ELASTIC PARAMETERS OF THE MEDIUM

A.N. Vasilevskiy^{1,2}, Yu.A. Dashevsky^{1,2,3}, S.V. Yaskevich^{1,4}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

³Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Lavrentyev Ave, 6, Novosibirsk, 630090, Russia,

⁴Institute of the Earth's Crust SB RAS, Lermontova Str., 128, Irkutsk, 664033, Russia,
e-mail: VasilevskiyAN@jggg.sbras.ru

The paper analyzes how the use of additional information obtained through the borehole gravimetric measurements affects the accuracy of determining the parameters of the medium when evaluating elastic impedances in the framework of AVO-analysis. The possibility of increasing the accuracy of seismic survey results in the procedure for determining elastic parameters through the use of borehole gravimetry data has been demonstrated.

Borehole gravimetry, AVO-analysis, elastic impedances, joint interpretation of seismic and gravity data

ВВЕДЕНИЕ

Процедура инверсии данных сейсморазведки в упругие параметры среды включает два основных этапа. Сначала оценивается отражательная способность как функция угла падения для каждой точки среды. В частности, это выполняется путем миграции в истинных амплитудах, что является наиболее технологичным методом получения отражательной способности, зависящей от угла.

Второй шаг включает в себя саму инверсию. Цель инверсии достигается за счет минимизации несоответствия между данными об отражательной способности, зависящими от угла, и синтетическими данными, полученными в результате численного моделирования уравнений Цеппритца [Воскресенский, 2001]. Не все параметризации уравнений Цепприца можно использовать для обращения. Debski и Tarantola [1995] не рекомендуют одновременно использовать плотность, скорости P - и S -волн в качестве набора параметров для AVO-инверсии. Они предложили, например, отдельно выбрать в качестве параметров инверсии плотность, скорость P -волн или скорость S -волн.

Если следовать этой рекомендации, то остаются проблемы оценки параметров среды и применения результатов для наземной сейсморазведки и геологической интерпретации:

1. Известно, что при AVO-анализе по отраженным волнам PP плотность определяется с большой погрешностью. В этом случае многообещающим выглядит использование обменных волн PS и снижение неопределенности в оценке плотности по сравнению с использованием только отраженных волн PP [Нефедкина и др., 2000; Jin et al., 2000].

2. Синтетические сейсмограммы часто не соответствуют данным наземной сейсморазведки. Трудной задачей оказывается сопоставление наблюдаемой и синтетической сейсмограмм, даже при «калибровке» с использованием скоростей, полученных по ВСП. Основная проблема заключается в разрешении: данные плотностного каротажа, на основе которых рассчитываются синтетические данные, характеризуют относительно небольшие объемы породы – несколько десятков сантиметров от скважины, в то время как сейсморазведка характеризует свойства породы на удалениях до нескольких сотен метров от скважины.

3. В литературе описана взаимосвязь литостатического давления с процентным содержанием песка, типом породы, глубиной и условиями осадконакопления, имеющая сильную корреляцию со скоростью и плотностью. Поскольку плотность может быть отнесена к конкретной литологии, корреляция между литостатическим давлением и литологией может быть установлена посредством надежной оценки плотности с требуемым пространственным разрешением [Verm et al., 1998].

В настоящей работе предлагается расширить возможности сейсморазведки за счет использования скважинных гравиметрических данных. Инвертируя данные скважинной гравиметрии, можно получить распределение плотности в области пространства, окружающем скважину. Далее значения плотности использовать для AVO-инверсии в качестве априорных данных или осуществлять совместную инверсию данных AVO и гравиметрии.

Современные возможности скважинной гравиметрии значительны [Beyer, 1991; Nind et al., 2013; Нежданов и др., 2016]:

- радиус исследований достигает 50 м, при обеспечении вертикальной разрешающей способности не хуже 5 м;
- точность определения плотности до 0.02 г/см³;
- демонстрируется высокая чувствительность к средней в пределах радиуса исследований плотности пород;
- допускается проведение исследований как в открытом, так и обсаженном стволе скважины;
- отмечается практическое отсутствие влияния собственно скважины (ее диаметра, скважинной жидкости, обсадной колонны, цемента и т. д.).

Отметим, что в самое последнее время новый импульс развитию гравиметрии, в том числе скважинной, дает применение недорогих MEMS гравиметров, которые по точности измерений и стабильности приближаются к классическим [Middlemiss et al., 2018; Carbone et al., 2020; Yu et al., 2020; Liu et al., 2022].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью сейсморазведки является определение по сейсмическим данным таких параметров пласта, как скорости продольных и поперечных волн, плотность, упругие константы и т. д. В рамках этой задачи ищутся поверхности, на которых эти параметры существенно изменяются. Особенно важно найти области, где изменения характерны для присутствия нефти/газа. Например, переход от глинистых к газонасыщенным пескам приводит к специфическому изменению соотношения скоростей P - и S -волн [Ампилов и др., 2007; Яковлев и др., 2011].

Сейсмические данные получают путем возбуждения сейсмических волн (обычно P -волн на поверхности) и регистрации рефрагированных/отраженных волн на поверхности или в скважине (в последнем случае говорят о вертикальном сейсмопрофилировании или ВСП) (рис. 1).

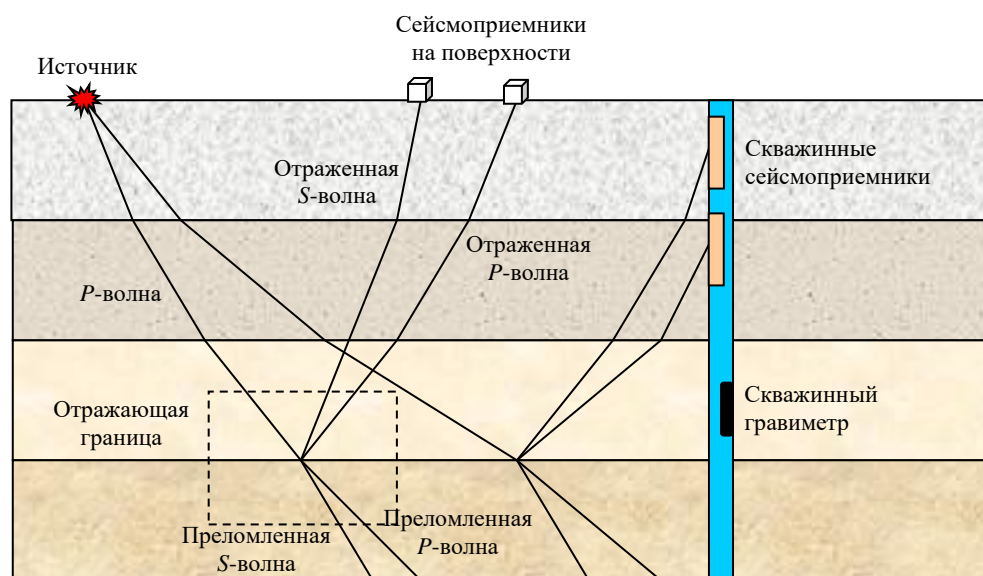


Рис. 1. Отраженные и преломленные волны на границе слоев. Прямоугольная область, выделенная пунктиром более подробно показана на рис. 2

Процесс инверсии и интерпретации сейсмических данных многообразен и очень сложен [Ампилов и др., 2007; Яковлев и др., 2011]. Мы рассмотрим следующие основные этапы этого процесса:

- *Миграция.* На этом шаге положения источников и приемников связываются с положением отражающей границы и углом падения;

- *Миграция в истинных амплитудах.* На этом шаге находится коэффициент отражения на отражающей границе. Обработав волны, приходящие на границу под разными углами, мы в итоге получаем изменение коэффициентов отражения $R^{PP}(\theta)$ (для отраженных P -волн) и $R^{PS}(\theta)$ (для обменных PS -волн) с углом падения θ ;

- *Анализ зависимости амплитуды отраженной волны от угла падения (AVO).* Имея коэффициенты отражения $R^{PP}(\theta)$ и $R^{PS}(\theta)$ для диапазона углов падения, можно найти изменение скоростей, либо упругих постоянных, либо каких-либо других параметров на отражающей границе.

Остановимся на последнем шаге, предполагая, что вся предобработка проведена и коэффициенты отражения $R^{PP}(\theta)$ и $R^{PS}(\theta)$ заданы с некоторой точностью.

Уравнения Цепприца и их приближения

Падение P -волны на границу между двумя слоями с разными скоростями P - и S - волн и плотностями приводит к возникновению четырех новых волн: отраженных P - и S - волн и проходящих P - и S -волн (рис. 2). Отношения их амплитуды к амплитуде падающей P -волны называются коэффициентами отражения и прохождения. Обозначим коэффициенты отражения для P - и S -волн как R^{PP} и R^{PS} . Они зависят от скоростей V_{Pj} и V_{Sj} , плотностей ρ_j и угла падения θ . Эта зависимость описывается уравнениями Цепприца. Эти уравнения довольно громоздки, поэтому используются различные приближения [Воскресенский, 2001]:

линеаризованное уравнение Цепприца Аки и Ричардса:

$$R^{PP}(\theta) \approx \frac{1}{2} \left(1 - 4 \frac{V_S^2}{V_P^2} \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\sec^2 \theta}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} - 4 \frac{V_S^2}{V_P^2} \frac{\Delta V_S}{V_S} \sin^2 \theta;$$

приближение Шуэ:

$$R^{PP}(\theta) \approx \underbrace{\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta V_P}{V_P} \right)}_A + \underbrace{\left(\frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} - 4 \frac{V_S^2}{V_P^2} \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta V_S}{V_S} \right) \right)}_B \sin^2 \theta + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P}}_C \frac{\sin^4 \theta}{1 - \sin^2 \theta}.$$

Из этих приближений хорошо видно, что естественно использовать средние значения:

$$V_P = (V_{P1} + V_{P2})/2, \quad V_S = (V_{S1} + V_{S2})/2, \quad \rho = (\rho_1 + \rho_2)/2$$

и вариации

$$\Delta V_P = V_{P1} - V_{P2}, \quad \Delta V_S = V_{S1} - V_{S2}, \quad \Delta \rho = \rho_1 - \rho_2,$$

а не скорости и плотности в каждом слое.

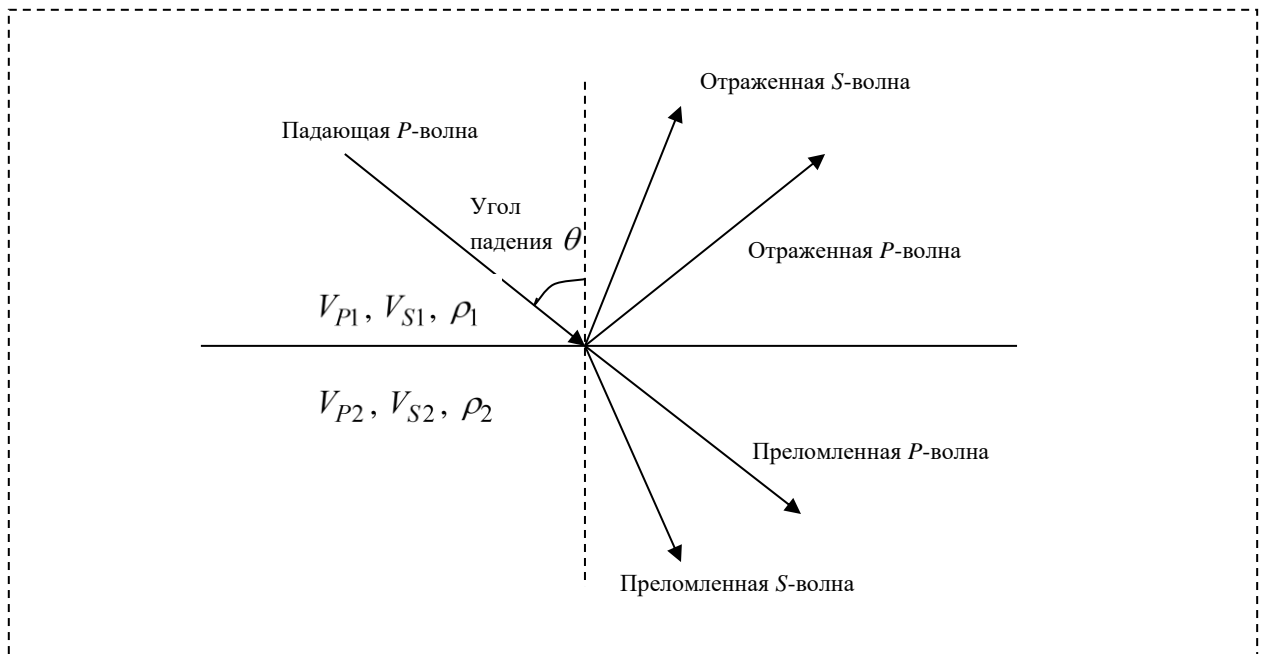


Рис. 2. Отраженные и проходящие волны на границе двух слоев

Упругая инверсия

Прежде всего заметим, что R^{PP} (и R^{PS}) зависят только от отношения скоростей и отношения плотностей. Это означает, что все шесть параметров не могут быть восстановлены. В лучшем случае мы можем надеяться найти четыре параметра, при этом должны быть заданы по крайней мере одна скорость и одна плотность. Разумно предположить, что мы знаем среднюю P -скорость $V_P = (V_{P1} + V_{P2})/2$ и среднюю плотность $\rho = (\rho_1 + \rho_2)/2$.

Используя приближение Шуэ, мы можем найти три параметра A , B и C , которые обеспечивают наилучшее соответствие данным. С другой стороны, нам нужно найти четыре параметра.

Для дальнейшего сокращения числа искоемых параметров используются различные эмпирические приближенные соотношения:

Линейная связь для глин $V_P \approx 1.16V_S + 1.36$ (км/с) [Castagna et al., 1985].

Уравнение Гарднера [Gardner et al., 1974] $\rho \approx 0.23V_P^{0.25}$, которое подразумевает

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx 0.25 \frac{\Delta V_P}{V_P}.$$

Подчеркнем, что эти соотношения являются приблизительными. Более того, в ситуациях, типичных для пород, насыщенных углеводородами, они могут существенно нарушаться.

Оказывается, что изменение соотношения скоростей $\Delta \frac{V_P}{V_S}$, а также упругие импедансы $\Delta(V_P\rho)$,

$\Delta(V_S\rho)$ более чувствительны к присутствию нефти/газа, чем исходные параметры ΔV_P , ΔV_S , $\Delta\rho$. Это означает, что лучше сразу восстановить один из перечисленных параметров по коэффициентам отражения R^{PP} и R^{PS} .

Комбинация AVO и скважинной гравиметрии

Одним из возможных способов совмещения AVO и скважинной гравиметрии является следующее:

- используя скважинные гравиметрические данные со слоистой моделью Земли, мы находим плотность вдоль скважины и, следовательно, среднюю плотность и изменение плотности для каждой пары слоев (для каждой границы раздела);
- использовать эти значения как точные при инверсии данных посредством AVO-анализа (традиционная схема предполагает, что мы знаем только среднюю плотность).

С одной стороны, данные измерений силы тяжести связаны только с плотностью. А с другой стороны, плотность плохо определяется по данным сейсморазведки [Lines, 1998]. Так что этот двухэтапный подход кажется оптимальным.

Еще одним способом совмещения сейсморазведки и скважинной гравиметрии является комбинированная инверсия, когда оба набора данных инвертируются вместе. Математически это предполагает минимизацию комбинированного функционала. В качестве отправной точки здесь можно использовать решение, полученное первым методом

Покажем далее, что использование более точной информации о плотности вдали от скважины, полученной с помощью инверсии гравиметрических данных, повысит точность AVO-анализа. С этой целью в следующем разделе мы вводим понятие условной неопределенности, а затем показываем, что

неопределенность таких показателей как изменение соотношения скоростей и отношения плотностей улучшается, когда они задаются с большей точностью.

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧАХ

Предположим, что параметры x_j , $j = 1, \dots, n$, модели и данные y_i , $i = 1, \dots, N$, связаны линейным отображением. Отображение

$$(x_1, \dots, x_n) \mapsto (y_1, \dots, y_N)$$

называют прямым. Если данных достаточно, говорят об инверсии:

$$(y_1, \dots, y_N) \mapsto (x_1, \dots, x_n).$$

Изменения параметров $x = (x_1, \dots, x_n)$ на $\delta x = (\delta x_1, \dots, \delta x_n)$ приводят к соответствующим изменениям данных $y = (y_1, \dots, y_N)$ на $\delta y = (\delta y_1, \dots, \delta y_N)$. И наоборот, вариации δy данных могут быть связаны с вариациями δx параметров.

В качестве меры вариации данных вводится следующая норма:

$$\|\delta y\| = \sqrt{\langle C \delta y, \delta y \rangle} = \sqrt{\sum_{i,k=1}^N c_{ik} \delta y_i \delta y_k},$$

где $\langle \cdot, \cdot \rangle$ обозначает Эвклидово скалярное произведение и $C = (c_{ik})$ есть положительно определенная симметричная матрица, называемая ковариационной матрицей. В случае однотипных и одномасштабных данных, вариации которых не коррелированы, C – единичная матрица.

Оценка неопределенности параметров

Предположим, что вариация параметров $\delta x = (\delta x_1, \dots, \delta x_n)$ вызывает вариацию данных δy .

Рассмотрим параметр $G = \sum_{j=1}^n g_j x_j$ – линейную комбинацию x_j . Будем называть максимальной

величину $|\delta G|$, $\delta G = \sum_{j=1}^n g_j \delta x_j$ на всем множестве $\delta x = (\delta x_1, \dots, \delta x_n)$, которая приводит к вариации δy

с условием $\|\delta y\| \leq \delta_0$ неопределенностью оценки G , соответствующую неопределенности данных δ_0 .

Обозначим эту максимальную величину неопределенности как δG^{\max} .

Поскольку зависимость данных от параметров линейна

$$y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j, \quad i = 1, \dots, N,$$

то вариации δy и δx связаны между собой той же матрицей $A = (a_{ij})$:

$$\delta y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \delta x_j, \quad i = 1, \dots, N.$$

Следовательно, возможно определение величины δG^{\max} для заданного значения δ_0 .

Задача нахождения неопределенности δG^{\max} может быть сформулирована как задача максимизации с ограничениями

$$\begin{cases} |\delta G| \rightarrow \max, \\ \langle B \delta x, \delta x \rangle \leq \delta_0^2. \end{cases}$$

Здесь $B = A^T C A$ – положительно определенная симметричная матрица, называемая информационной.

Условная неопределенность

Предположим, что мы пытаемся найти величину неопределенности оценки некоторого параметра

$G = \sum_{j=1}^n g_j x_j$. Пусть значения некоторых других параметров известны и их точность задана. Будем

полагать, что номера таких параметров $n(1), \dots, n(k)$, а их вариации не превышают

$$|\delta x_{n(l)}| \leq \delta_l, \quad l = 1, \dots, k,$$

где $k \leq n$ – номер дополнительного условия.

Будем называть условной неопределенностью δG^{cond} такую максимальную величину $|\delta G|$,

$\delta G = \sum_{j=1}^n g_j \delta x_j$, для всех вариаций $\delta x = (\delta x_1, \dots, \delta x_n)$ при условии, что $|\delta x_{n(l)}| \leq \delta_l, \quad l = 1, \dots, k$, которая

приводит к вариации δy с условием $\|\delta y\| \leq \delta_0$.

Для определения условной неопределенности δG^{cond} , необходимо решить следующую задачу максимизации с ограничениями:

$$\begin{cases} \left| \sum_{j=1}^n g_j \delta x_j \right| \rightarrow \max, \\ \langle C A \delta x, A \delta x \rangle \leq \delta_0^2, \\ |\delta x_{n(l)}| \leq \delta_l, \quad l = 1, \dots, k. \end{cases}$$

Алгоритм решения этой задачи, а также процедуры нахождения условной неопределенности программно реализованы и детально описаны в [Dashevsky et al., 2012].

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ В ЗАДАЧАХ AVO-АНАЛИЗА

Предположим, что коэффициенты отражения $R^{PP}(\theta)$ известны для диапазона углов θ_j , $j=1, \dots, m$, и мы ищем некоторый параметр G , зависящий от скоростей и плотностей, например, изменение импеданса P -волн: $\Delta I_P = I_{P1} - I_{P2} = V_{P1}\rho_1 - V_{P2}\rho_2$. Наша цель – оценить (условную) неопределенность δG^{cond} в предположении, что $R^{PP}(\theta)$ и некоторые параметры известны с заданной точностью. Мы будем использовать следующие параметры:

$$x_1 = V_P, x_2 = \Delta V_P, x_3 = V_S, x_4 = \Delta V_S, x_5 = \rho, x_6 = \Delta \rho.$$

Зафиксируем набор параметров $V_{P1}, V_{P2}, V_{S1}, V_{S2}, \rho_1, \rho_2$ (точка (x_1, \dots, x_6)) и перейдем от отображения $(x_1, \dots, x_6) \mapsto R^{PP}(\theta_j)$ к его линейному приближению и заменим параметр G его линейным аналогом. Тогда вариации δx , δR^{PP} , δG связаны линейными отображениями следующим образом:

$$\delta R^{PP}(\theta_j) = \sum_{k=1}^6 a_{jk} \delta x_k, \quad a_{jk} = \frac{\partial R^{PP}(\theta_j)}{\partial x_k},$$

$$\delta G = \sum_{k=1}^6 g_k \delta x_k, \quad g_k = \frac{\partial G}{\partial x_k}.$$

Таким образом, приходим к следующей постановке задачи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \sum_{k=1}^6 g_k \delta x_k \right| \rightarrow \max \\ \left\| \sum_{k=1}^6 a_{jk} \delta x_k \right\| \leq \delta_0, \\ |\delta x_l| \leq \delta_l, \quad l = 1, \dots, 6, \end{array} \right.$$

(некоторые из δ_l них могут быть равны ∞ , что означает, что у нас нет информации о соответствующем параметре).

Параметры слоев (скорости в м/с, плотности в г/см³)

Таблица 1

Набор	V_{P1}	V_{P2}	V_{S1}	V_{S2}	ρ_1	ρ_2
1	2249	2458	731	1612	2.14	1.89
2	2743	2835	1395	1762	2.06	2.06
3	2898	2857	1290	1666	2.425	2.275
4	3811	3453	2263	2302	2.4	2.1

Поскольку результат инверсии может сильно зависеть от набора параметров, для которых выполняется процесс линеаризации, рассмотрим в качестве примера четыре реальных набора параметров, взятых из [Воскресенский, 2001] и представленных в табл. 1. Верхний слой – сланец, а нижний слой – газонасыщенный песок.

Неопределенность оценки параметров среды без учета априорной информации о плотности

Далее мы будем предполагать, что $R^{PP}(\theta)$ задан с точностью 10 % : $\|\delta R^{PP}\| \leq 0.1 \|R^{PP}\|$. Будем считать, что имеется априорная информация только о средних величинах V_P, V_S, ρ , это означает, что $\delta_1 = \delta_3 = \delta_5 = 0$. В результате инверсии данных, представленных в табл. 1, были получены численные оценки условной неопределенности параметров. В ячейках табл. 2 для параметров $\Delta V_P, \Delta V_S, \Delta \rho, \Delta(V_P/V_S), \Delta(V_P\rho), \Delta(V_S\rho)$ показаны эти неопределенности.

Таблица 2

Неопределенность параметров (скорости в м/с и плотности в г/см³)

Набор	ΔV_P	ΔV_S	$\Delta \rho$	$\Delta(V_P/V_S)$	$\Delta(V_P\rho)$	$\Delta(V_S\rho)$
1	2406.4	2598.6	2.003	4.312	677.1	4105.9
2	499.3	389.8	0.345	0.137	136.7	341.0
3	926.8	723.8	0.716	0.375	274.3	863.96
4	1311.2	838.1	0.764	0.049	399.8	416.2
Диапазон возможных значений параметра	1600	1500	0.5	1.57	5260	4300

Значение неопределенности оценки того или иного параметра зависит от геологической ситуации. Так, например, для набора 1 (см. табл. 2) значение неопределенности для всех параметров, за исключением $\Delta(V_P\rho)$, больше, чем для других наборов. Значение неопределенности оценки плотности в трех случаях из четырех больше величины интервала возможных значений плотности. Это означает, что плотность геологического вещества невозможно определить, инвертируя сейсмические данные. Неопределенность оценки P -импеданса $\Delta(V_P\rho)$ характеризуется наименьшим значением, по сравнению с остальными параметрами.

Неопределенность в оценке параметров при наличии сторонней информации о распределении плотности

Предположим теперь, что на отражающей границе с некоторой точностью известно значение скачка плотности. Эти данные могут быть получены на основе инверсии результатов данных скважинной гравиметрии. А именно, предположим, что $\delta_6 = 0, 0.05, 0.5$ (г/см³) и вновь исследуем значения условной неопределенности оценки значений уже рассмотренных наборов параметров разреза. Результаты этого анализа представлены в табл. 3–5.

Таблица 3

Неопределенность параметров при точном задании плотности (скорости в м/с, плотности в г/см³)

Набор	ΔV_P	ΔV_S	$\Delta \rho$	$\Delta(V_P/V_S)$	$\Delta(V_P\rho)$	$\Delta(V_S\rho)$
1	4.22	2.78	0.0	2.38	1.56	2.37
2	3.95	3.09	0,0	1.93	1.08	1.79
3	4.57	3.27	0.0	2.20	1.18	2.11
4	4.25	3.89	0.0	1.03	1.15	1.21

Таблица 4

Неопределенности оценки параметров для случая погрешности определения плотности 0.05 г/см³ (скорости в м/с, плотности в г/см³)

Набор	ΔV_P	ΔV_S	$\Delta \rho$	$\Delta(V_P/V_S)$	$\Delta(V_P\rho)$	$\Delta(V_S\rho)$
1	166.4	301.5	0.05	0.681	241.96	653.6
2	126.4	118.5	0.05	0.071	126.24	189.2
3	155.2	169.5	0.05	0.153	231.44	374.1
4	225.6	178.5	0.05	0.049	347.16	344

Таблица 5

Неопределенности оценки параметров для случая погрешности определения плотности 0.5 г/см³ (скорости в м/с, плотности в г/см³)

Набор	ΔV_P	ΔV_S	$\Delta \rho$	$\Delta(V_P/V_S)$	$\Delta(V_P\rho)$	$\Delta(V_S\rho)$
1	702.4	838.5	0.5	1.623	378.72	1548
2	499.2	366	0.5	0.136	136.76	339.7
3	708.8	555	0.5	0.339	273.52	791.2
4	958.4	604.5	0.5	0.05	399.76	417.1

Сравнивая результаты, представленные в табл. 3, с результатами табл. 4 и 5, легко сделать заключение, что неопределенность исходных значений плотности существенным образом влияет на точность определения параметров в результате инверсии: чем больше погрешность задания плотности, тем выше неопределенность результатов инверсии.

ВЫВОДЫ

В нашей работе был выполнен анализ того, как использование дополнительной информации в виде гравиметрических измерений в скважине при оценке упругих импедансов в рамках AVO-анализа влияет на точность определения параметров среды. Мы намеренно предположили, что работаем в условиях ограниченной информации о скоростях распространения волн в среде, но считаем, что этот факт не снижает важности полученных результатов, а помогает более явно сформулировать прирост информативности.

Неопределенность оценки параметров существенно зависит от типа и самих значений параметров разреза.

Стороннее задание значений плотности значительно улучшает точность определения параметров ΔV_P и ΔV_S .

Стороннее привлечение значений плотности наименьшее влияние оказывает на точность оценки параметров $\Delta(V_P\rho)$ и $\Delta(V_S\rho)$. Неопределенность определения P -импеданса $\Delta(V_S\rho)$ менее всего зависит от точности задания плотности.

В некоторых случаях априорное задание плотности уменьшает неопределенность оценки $\Delta(V_P/V_S)$. Заметим, что этот параметр служит одним из индикаторов присутствия в разрезе углеводородов.

Работа выполнена в рамках государственного задания по проекту FWZZ-2022-0019 (0266-2022-0019) ИНГГ СОРАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Ампиров Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В.** Почти все о сейсмической инверсии. Ч. 1 // Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 4. – С. 3–16.
- Воскресенский Ю.Н.** Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов. – М., 2001. – 68 с.
- Нежданов А.А., Пережогин А.С., Полин И.И.** Определение подсчетных параметров сенонских газовых залежей помощью гравитационного каротажа // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 5. – С. 8–14.
- Нефедкина Т.В., Курдюкова Т.В., Бузлуков В.В.** Определение упругих параметров среды инверсией данных AVO-анализа продольных и обменных волн // Доклады академии наук. – № 371 (4). – С. 532–534.
- Яковлев И.В., Ампиров Ю.П., Филиппова К.Е.** Почти все о сейсмической инверсии. Ч. 2 // Технологии сейсморазведки. – 2011. – № 1. – С. 5–15.
- Beyer L.A.** Borehole gravity survey: SEG Short Course notes. – 1991. – 350 p.
- Carbone D., Antoni-Micollier L., Hammond G., de Zeeuw-van Daltsen E., Rivalta E., Bonadonna C., Messina A., Lautier-Gaud J., Toland K., Koymans M., Anastasiou K., Bramsiepe S., Cannavò F., Contrafatto D., Frischknecht C., Greco F., Marocco G., Middlemiss R., Ménoret V., Noack A., Passarelli L., Paul D., Prasad A., Siligato G, Vermeulen P.** The NEWTON-g gravity imager: toward new paradigms for terrain gravimetry // Frontiers in Earth Science. – 2020. – Vol. 8. – 573396, doi: 10.3389/feart.2020.573396.
- Castagna J.P., Batzle M.L., Eastwood R.L.** Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks // Geophysics. – 1985. – Vol. 50. – P. 571–581, doi: 10.1190/1.1441933.
- Dashevsky Yu.A., Dyatlov G.V., Vasilevskiy A.N.** Increasing the resolution of VSP AVA analysis through using borehole gravity information. – 2012. – Patent application WO2012144922A1 WIPO (PCT).
- Debski W., Tarantola A.** Information on elastic parameters obtained from the amplitudes of reflected waves // Geophysics. – 1995. – Vol. 60 (5). – P. 1426–1436, doi: 10.1190/1.1443877.
- Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R.** Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps // Geophysics. – 1974. – Vol. 39 (6). – P. 770–780, doi: 10.1190/1.1440465.

- Jin S., Cambois G., Vuillermoz C.** Shear-wave velocity and density estimation from *PS*-wave AVO analysis: Application to an OBS data set from the North Sea // *Geophysics*. – 2000. – Vol. 65. – P. 1446–1454, doi: 10.1190/1.1444833.
- Lines L.R.** Density contrast is difficult to determine from AVO // *CREWES Research Report*. – 1998. – Vol. 10. – P. 47-1–47-8.
- Liu H.-F., Luo Z.-C., Hu Z.-K., Yang S.-Q., Tu L.-C., Zhou Z.-B., Kraft M.** A review of high-performance MEMS sensors for resource exploration and geophysical applications // *Petroleum Science*. – 2022. – Vol. 19 (6). – P. 2631–2648, doi: 10.1016/j.petsci.2022.06.005.
- Middlemiss R.P., Bramsiepe S.G., Douglas R., Hild S., Hough J., Paul D.J., Samarelli A., Rowan S., Hammond G.D.** Microelectromechanical system gravimeters as a new tool for gravity imaging // *Philosophical transactions of the Royal Society A*. – 2018. – Vol. 376. – 20170291, doi: 10.1098/rsta.2017.0291.
- Nind C., MacQueen J., Wasylechko R., Chemam M., Nackers C.** GRAVILOG: An update on the development and use of Borehole Gravity for Mining Exploration // *ASEG Extended Abstracts*. – 2013. – Vol. 2013 (1). – P. 1–5, doi: 10.1071/ASEG2013ab048.
- Verm R., Liang L., Hilterman F.** Significance of geopressure in predicting lithology // *The Leading Edge*. – 1998. – Vol. 17 (2). – P. 227–234, doi: 10.1190/1.1437952.
- Yu G., Tu L., Hu F.** MEMS-based vector borehole gravity meter development // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – 2020. – P. 920–924, doi: 10.1190/segam2020-3398784.1.

REFERENCES

- Ampilov Yu.P., Barkov A.Yu., Yakovlev I.V.** Almost everything about seismic inversion. Part 1 // *Seismic Technologies*. – 2009. – Vol. 4. – P. 3–16.
- Beyer L.A.** Borehole gravity survey: SEG Short Course notes. – 1991. – 350 p.
- Carbone D., Antoni-Micollier L., Hammond G., de Zeeuw-van Dalfsen E., Rivalta E., Bonadonna C., Messina A., Lautier-Gaud J., Toland K., Koymans M., Anastasiou K., Bramsiepe S., Cannavò F., Contrafatto D., Frischknecht C., Greco F., Marocco G., Middlemiss R., Ménoret V., Noack A., Passarelli L., Paul D., Prasad A., Siligato G, Vermeulen P.** The NEWTON-g gravity imager: toward new paradigms for terrain gravimetry // *Frontiers in Earth Science*. – 2020. – Vol. 8. – 573396, doi: 10.3389/feart.2020.573396.
- Castagna J.P., Batzle M.L., Eastwood R.L.** Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks // *Geophysics*. – 1985. – Vol. 50. – P. 571–581, doi: 10.1190/1.1441933.
- Dashevsky Yu.A., Dyatlov G.V., Vasilevskiy A.N.** Increasing the resolution of VSP AVA analysis through using borehole gravity information. – 2012. – Patent application WO2012144922A1 WIPO (PCT).
- Debski W., Tarantola A.** Information on elastic parameters obtained from the amplitudes of reflected waves // *Geophysics*. – 1995. – Vol. 60 (5). – P. 1426–1436, doi: 10.1190/1.1443877.
- Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R.** Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps // *Geophysics*. – 1974. – Vol. 39 (6). – P. 770–780, doi: 10.1190/1.1440465.
- Jin S., Cambois G., Vuillermoz C.** Shear-wave velocity and density estimation from *PS*-wave AVO analysis: Application to an OBS data set from the North Sea // *Geophysics*. – 2000. – Vol. 65. – P. 1446–1454, doi: 10.1190/1.1444833.
- Lines L.R.** Density contrast is difficult to determine from AVO // *CREWES Research Report*. – 1998. – Vol. 10. – P. 47-1–47-8.

- Liu H.-F., Luo Z.-C., Hu Z.-K., Yang S.-Q., Tu L.-C., Zhou Z.-B., Kraft M.** A review of high-performance MEMS sensors for resource exploration and geophysical applications // *Petroleum Science*. – 2022. – Vol. 19 (6). – P. 2631–2648, doi: 10.1016/j.petsci.2022.06.005.
- Middlemiss R.P., Bramsiepe S.G., Douglas R., Hild S., Hough J., Paul D.J., Samarelli A., Rowan S., Hammond G.D.** Microelectromechanical system gravimeters as a new tool for gravity imaging // *Philosophical transactions of the Royal Society A*. – 2018. – Vol. 376, 20170291, doi: 10.1098/rsta.2017.0291.
- Nefedkina T.V., Kurdyukova T.V., Buzlukov V.V.** Determination of elastic parameters of the medium through inversion of data provided by the AVO analysis of longitudinal and exchange waves // *Doklady Earth Sciences*. – 2000. – Vol. 371A. – P. 547–549.
- Nezhdanov A.A., Perezhogin A.S., Polyn I.I.** Determination of volumetric parameters for Senonian gas deposits through gravity logging // *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. – 2016. – Vol. 5. – P. 8–14.
- Nind C., MacQueen J., Wasylechko R., Chemam M., Nackers C.** GRAVIOLOG: An update on the development and use of Borehole Gravity for Mining Exploration // *ASEG Extended Abstracts*. – 2013. – Vol. 2013 (1). – P. 1–5, doi: 10.1071/ASEG2013ab048.
- Verm R., Liang L., Hilterman F.** Significance of geopressure in predicting lithology // *The Leading Edge*. – 1998. – Vol. 17 (2). – P. 227–234, doi: 10.1190/1.1437952.
- Voskresensky Yu.N.** Study of changes in the amplitudes of seismic reflections for prospecting and exploration of hydrocarbon deposits. – Moscow, 2001. – 68 p.
- Yakovlev I.V., Ampilov Yu.P., Filippova K.E.** Almost everything about seismic inversion. Part 2 // *Seismic Technologies*. – 2011. – Vol. 1. – P. 5–15.
- Yu G., Tu L., Hu F.** MEMS-based vector borehole gravity meter development // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – 2020. – P. 920–924, doi: 10.1190/segam2020-3398784.1.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЕВСКИЙ Александр Николаевич – научный сотрудник лаборатории физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; старший преподаватель кафедры геофизики Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: обработка и интерпретация гравитационных и магнитных данных, решение обратных задач геофизики.

ДАШЕВСКИЙ Юлий Александрович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры геофизики Новосибирского государственного университета; главный научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН и Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Основные научные интересы: решение прямых и обратных задач электромагнитных методов геофизики; выявление, обоснование и применение нереализованных возможностей геоэлектрики.

ЯСКЕВИЧ Сергей Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН и Института земной коры СО РАН. Основные научные интересы: обработка и интерпретация данных сейсморазведки.

*Статья поступила 16 января 2023,
принята к печати 20 февраля 2023*