



Математическое моделирование нового метода обработки сейсмосигнала на примере разреза Саратовского Правобережья. Часть 2

Анатолий Александрович Фонин , Сергей Германович Сучков,
Виктор Андреевич Николаевцев, Сергей Иванович Михеев

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия
Контакт для переписки: fonin.a@mail.ru 

Аннотация. В работе представлена апробация нового способа сейсморазведки с двумя заглубленными приемниками на одной вертикали, который позволяет сравнивать две сейсмограммы: расчетную теоретическую с экспериментальной, очищенной от невертикальных сигналов.

С помощью метода наименьших квадратов производился поиск глобального минимума функции невязки расчетной и экспериментальной форм сейсмоимпульсов. Реализация алгоритма решения обратной задачи сейсморазведки осуществлялась в программном комплексе MatLab.

Построение теоретической сейсмограммы включало вычисление спектра входного импульса, расчет коэффициентов отражения и прохождения волн на границах раздела пород с разными физическими параметрами, вычисление формы принятых приемниками сейсмоимпульсов.

Проведено сравнение теоретической и экспериментальной сейсмограмм реальной геологической структуры, полученных в программном комплексе COMSOL Multiphysics. При максимальном совпадении сейсмограмм можно утверждать, что найденные параметры сред (толщина каждого слоя, его плотность, скорости распространения продольных акустических волн и затухания сейсмических волн в геологической среде) соответствуют реальному разрезу горных пород на вертикали под датчиками.

Результаты показывают, что разработанный алгоритм позволяет получить сейсмограмму, которая практически совпадает с экспериментальной, соответствующей реальному разрезу горных пород, при подобранных геологических параметрах сред.

Ключевые слова: сейсморазведка, сейсмограмма, акустические параметры слоев, отражение сейсмических волн, MatLab, COMSOL, Саратовское Правобережье

Цитирование: Фонин А. А., Сучков С. Г., Николаевцев В. А., Михеев С. И. 2023. Математическое моделирование нового метода обработки сейсмосигнала на примере разреза Саратовского Правобережья. Часть 2 // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 9. № 2 (34). С. 139–152. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-2-139-152>

Поступила 02.05.2023; одобрена 29.06.2023; принята 30.06.2023

Mathematical modeling of a new method for processing a seismic signal on the example of a section of the Saratov right bank. Part 2

Anatoly A. Fonin[✉], Sergey G. Suchkov, Victor A. Nikolayevtsev, Sergey I. Mikheyev

Saratov State University, Saratov, Russia
Corresponding author: fonin.a@mail.ru[✉]

Abstract. This paper presents a new method of seismic exploration with two buried receivers on the same vertical, which helps in comparing the experimental seismogram cleared of non-vertical signals with the calculated theoretical seismogram, which depends on the parameters of the layered structure, such as the thickness of the layers, their density, velocity of propagation of longitudinal acoustic waves in rock, and seismic quality factors of media.

The method of least squares aided in the search for the global minimum of the discrepancy function of the calculated and experimental seismic pulse waveforms. The implementation of the algorithm for solving the inverse seismic problem was carried out in the MatLab software package.

The construction of a theoretical seismogram includes the calculation of the spectrum of the input impulse, calculation of the frequency dependences of the reflection coefficients and the passage of waves at the interfaces of rocks with different physical parameters, the calculation of the shape of the seismic impulses received by the receivers.

A comparison of the calculated and real parameters of the geological structure obtained in the COMSOL Multiphysics software package shows that the developed algorithm results in obtaining a seismogram that practically coincides with the experimental

seismogram corresponding to the real rock section, with appropriate geological parameters of media, such as thickness, density and propagation velocity of acoustic waves, as well as quality factors.

Keywords: seismic survey, seismogram, acoustic parameters of layers, reflection of seismic waves, MatLab, COMSOL, Saratov right bank

Citation: Fonin, A. A., Suchkov, S. G., Nikolayevtsev, V. A., & Mikheyev, S. I. (2023). Mathematical modeling of a new method for processing a seismic signal on the example of a section of the Saratov right bank. Part 2. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 9(2), 139–152. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-2-139-152>

Received May 2, 2023; Reviewed June 29, 2023; Accepted June 30, 2023

Введение

Данная статья является продолжением ранее опубликованной первой части работы [Фонин и др., 2023], в которой представлен новый метод обработки сейсмосигнала, сформулирована общая постановка задачи и приведены результаты численного моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics экспериментальной сейсмограммы на примере модели «палеорусло», составленной на фактических данных по Саратовскому Правобережью. В этой статье будет изложен алгоритм решения обратной задачи и результаты его применения для расчета параметров реальной геологической структуры. В связи с этим в рамках данной части исследования были поставлены следующие задачи:

- 1) разработка такого математического аппарата для вычисления теоретической сейсмограммы на основе модели вертикально распространяющихся продольных акустических волн в слоистой структуре, который учитывает толщины слоев, скорости распространения продольных акустических волн в породах, плотности и акустические добротности сред;
- 2) написание кода в программном комплексе MatLab для реализации разработанного математического аппарата;
- 3) реализация алгоритма поиска глобального минимума функции невязки методом наименьших квадратов для определения параметров слоев горных пород, соответствующих математической модели численного эксперимента, описанного в первой части работы [Фонин и др., 2023].

Результатом решения прямой задачи сейсморазведки является сейсмограмма разреза горных пород, соответствующая заранее известным параметрам среды. На данном этапе также может производиться обработка сигналов и очищение полученных данных от невертикальных сигналов. В первой части данной статьи [Фонин и др., 2023] решена прямая задача для реальной горной структуры с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics [Акустика], который позволяет получить близкие к экспериментальным сейсмограммы.

Обратная задача сейсморазведки, имеющая большой практический интерес [Михайленко, Эпов, 2010; Wang, 2016; Aster и др., 2018], заключается в определении параметров слоев геологического разреза по его сейсмограмме.

Методы

Рассмотрим физико-математические основы расчета теоретической сейсмограммы.

В теоретической модели, как и в экспериментальной, в качестве источника акустической волны предполагается взрыв на поверхности земли, который оказывает на поверхность силовое воздействие, описываемое формулой [Фонин и др., 2023]:

$$F_{in}(t) = \frac{1 - e^{-\frac{9t}{T_{imp}}}}{1 + e^{\frac{9}{T_{imp}} \left(\frac{t}{T_{imp}} - 1 \right)}} \cdot \sin\left(2\pi F_{imp} t\right), \quad (1)$$

где T_{imp} — длительность импульса, с; F_{imp} — центральная частота, Гц; t — время, с. Входной импульс необязательно задавать аналитически, он может быть представлен и в цифровом виде произвольной формы.

Построенная в программном комплексе MatLab временная характеристика возбуждающего импульса (1) при $T_{imp} = 0,01$ с и $F_{imp} = 100$ Гц приведена на рис. 1, сверху. Спектр этого сигнала определяется преобразованием Фурье [Bracewell, 1986], записанным для конечного интервала длительности сигнала $(0, t_k)$:

$$\Phi(\omega) = \int_0^{t_k} F_{in}(t) e^{i\omega t} dt. \quad (2)$$

Спектр частот для сейсмоимпульса вида (1) и $t_k = 0,015$ с, рассчитанный по формуле (2) в MatLab, показан на рис. 1, снизу.

Будем считать, что на каждой частоте спектра возбуждается плоская волна, распространяющаяся по вертикали, с амплитудой, убывающей по закону сферической волны. Схема распространения акустической волны в слоистой среде и расположение приемников представлены на рис. 2.

В модели глубина зоны малых скоростей (ЗМС) принята 15 м, а сейсмоприемники располагаются на глубине 50 и 80 м на вертикальной линии.

Возбуждение сейсмоимпульса создается взрывом или вибромашиной на поверхности, что может быть смоделировано как давление, приложенное к верхней границе модели в точке с координатой $(0; 0)$. Связь давления и деформации можно представить посредством коэффициентов Ламе [Исакович, 1973]:

$$u_{11} = \frac{\lambda + \mu}{\mu(3\lambda + 2\mu)} \sigma_{11} - \frac{\lambda}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} (\sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad u_{23} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{23}, \quad (3)$$

где u — тензор деформации; σ — тензор напряжения; μ и λ — коэффициенты Ламе, которые однозначно можно рассчитать, зная скорость акустической волны и плотность в породах.

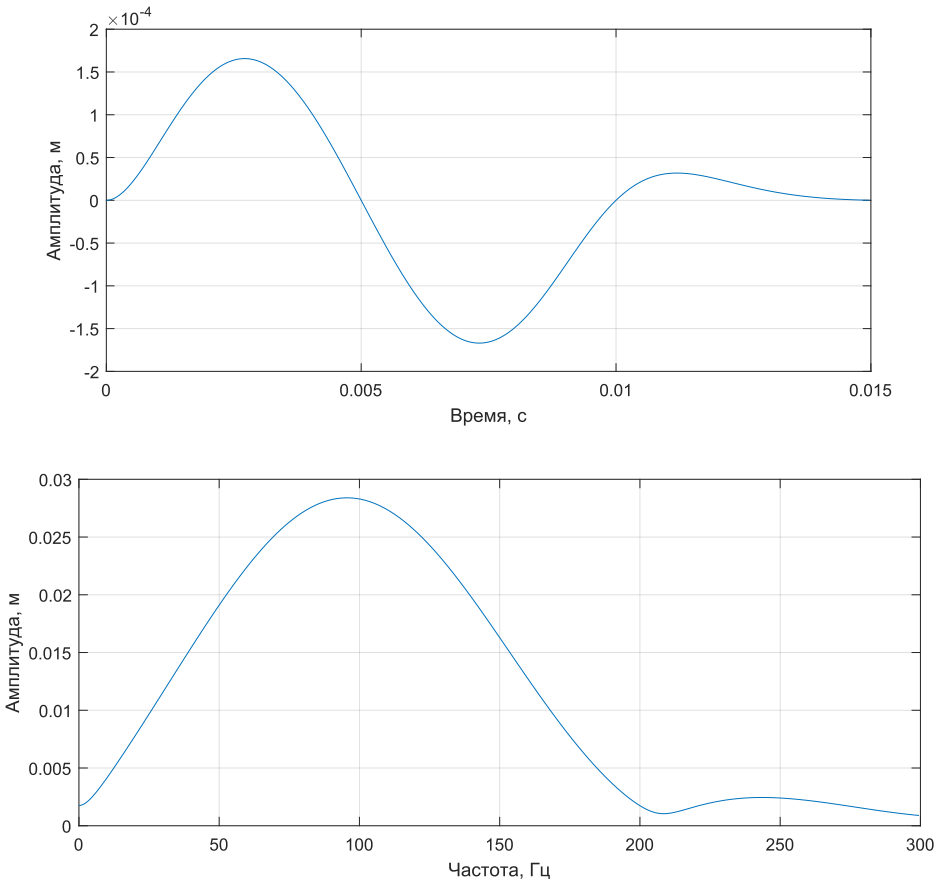


Рис. 1. Форма (сверху) и спектр (снизу) возбуждающего сейсмоимпульса, рассчитанные в программном комплексе MatLab

Fig. 1. Shape (top) and spectrum (bottom) of the input pulse calculated by MatLab

Импульс акустической продольной волны распространяется вглубь структуры со скоростью v , зависящей от свойств породы.

Коэффициент отражения от n -й идеальной плоской границы определяется формулой [Бреховских, 1973; Зацепин, 2005; Квеско, Квеско, 2018]:

$$R_n = \frac{Z_{n+1} - Z_n}{Z_{n+1} + Z_n}, \quad (4)$$

где $Z_n = \rho_n v_n$ — акустический импеданс n -го слоя; ρ_n — плотность n -го слоя; v_n — скорость распространения акустической продольной волны для n -го слоя.

Коэффициент прохождения волны через границу между n -м и $(n + 1)$ -м слоем:

$$D_n = \frac{2Z_{n+1}}{Z_n + Z_{n+1}}. \quad (5)$$

Для учета наклона и шероховатости поверхности в точке отражения необходимо ввести коэффициент рассеяния n -й границы $a_n < 1$, который определяет амплитуду отраженного по вертикали сигнала.

Тогда эффективный коэффициент отражения:

$$V_n = a_n \cdot R_n, \tag{6}$$

а эффективный коэффициент прохождения:

$$W_n = a_n \cdot D_n. \tag{7}$$

Давление, создаваемое на сейсмоприемнике отраженными сигналами P_r , рассчитывается [Дьяконов, 2005] как суперпозиция плоских волн, отраженных и переотраженных от границ (рис. 2) на каждой частоте, с учетом их амплитуды, набега фазы и рассеяния. Интегрирование отраженных сигналов проводится в диапазоне частот, определяемом спектром возбуждающего сигнала от $f_1 = 0$ до $f_2 = 300$ Гц.

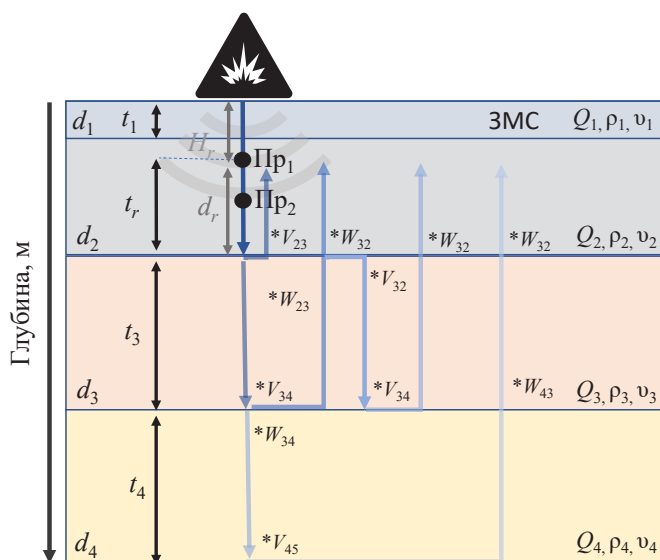


Рис. 2. Схема распространения акустической волны в слоистой среде

Примечание. Пр1 — верхний приемник, Пр2 — нижний приемник; H_r — глубина расположения первого датчика, d_r — расстояние от верхнего датчика до первой границы раздела пород; V — коэффициент отражения от соответствующей границы, W — коэффициент прохождения через границу, t — время прохождения волны через слой, d — мощность соответствующего слоя, Q — добротность среды, ρ — плотность, v — скорость продольной волны; ЗМС — зона малых скоростей.

Fig. 2. Scheme of propagation of an acoustic wave in a layered structure

Note. Пр1 is the upper receiver, Пр2 is the lower receiver; H_r is the location depth of the first sensor, d_r is the distance from the upper sensor to the first rock interface; V is the reflection coefficient from the corresponding boundary, W is the penetration coefficient through the boundary, t is the time of the wave passing through the layer, d is the thickness of the corresponding layer, Q is the quality factor, ρ is the density, v is the velocity of the P-wave; ЗМС is the zone of low speeds.

Для примера приведем расчет временной зависимости давления на приемнике Пр1 для модели с ЗМС и тремя границами, когда датчик расположен ниже ЗМС (рис. 2):

$$\begin{aligned}
 P_r(T) = \operatorname{Re} \int_{f_1}^{f_2} df \Phi(f) & \left[W_{12} V_{23} e^{i2\pi f(t_1+t_2+t_r-T)} e^{-i\pi f \left(\frac{t_1}{Q_1} + \frac{t_2+t_r}{Q_2} \right)} \frac{1}{d_1+d_2+d_r} + \right. \\
 & + W_{12} W_{23} V_{34} W_{32} e^{i2\pi f(t_1+t_2+2t_3+t_r-T)} e^{-i\pi f \left(\frac{t_1}{Q_1} + \frac{t_2+t_r}{Q_2} + \frac{2t_3}{Q_3} \right)} \frac{1}{d_1+d_2+2d_3+d_r} + \\
 & + W_{12} W_{23} V_{34}^2 V_{32} W_{32} e^{i2\pi f(t_1+t_2+4t_3+t_r-T)} e^{-i\pi f \left(\frac{t_1}{Q_1} + \frac{t_2+t_r}{Q_2} + \frac{4t_3}{Q_3} \right)} \frac{1}{d_1+d_2+4d_3+d_r} + \\
 & \left. + W_{12} W_{23} W_{34} V_{45} W_{43} W_{32} e^{i2\pi f(t_1+t_2+2t_3+2t_4+t_r-T)} e^{-i\pi f \left(\frac{t_1}{Q_1} + \frac{t_2+t_r}{Q_2} + \frac{2t_3}{Q_3} + \frac{2t_4}{Q_4} \right)} \times \right. \\
 & \left. \times \frac{1}{d_1+d_2+2d_3+2d_4+d_r} \right], \quad (8)
 \end{aligned}$$

где T — текущее время; $t_r = d_r/v_2$ — время прохождения волны между первой границей под датчиком и самим датчиком; $t_n = d_n/v_n$ — время прохождения волны через n -й слой; W — коэффициенты прохождения; V — коэффициенты отражения; Q_n — добротность n -й среды.

Первое слагаемое формулы (8) рассчитывает импульс, прошедший ЗМС и отраженный от второй границы, поэтому функция (2) умножается на W_{12} (коэффициент прохождения первой границы) и V_{23} (коэффициент отражения от второй границы). Добротность Q влияет на затухание амплитуды в геологической среде. Последние дробные множители в каждом из слагаемых формулы (8) учитывают уменьшение амплитуды сигнала при распространении, связанное с увеличением сферического фронта волны. В случае сферической формы волнового фронта амплитуда линейно убывает с пройденным волной расстоянием. Проанализировав подобным образом каждую волну на рис. 2, получаем остальные слагаемые в формуле (8).

В представленной формуле (8) не учитываются переотражения более высоких порядков, поскольку они не вносят существенного вклада в результирующую сейсмограмму.

При анализе большого числа слоев структуры после расчета трех слоев вычисляется входной сигнал в следующие слои, и расчеты параметров следующих трех слоев повторяются по описанному алгоритму.

Описанный выше математический аппарат был реализован в пакете MatLab. Входной импульс задавался формулой (1), спектр рассчитывался по формуле (2). Коэффициенты отражения и прохождения для каждой границы рассчитывались согласно формулам (6) и (7). Сейсмограммы для приемников Пр1 и Пр2 были получены по формуле (8).

Согласно ранее описанному методу [Фонин и др., 2023], экспериментальная сейсмограмма формируется путем регистрации акустического сигнала в двух различных точках на одной вертикали, последующего смещения сейсмограмм относительно друг друга на время прохождения волны между приемниками и удаления несовпадающих импульсов, пришедших не по вертикали.

Итоговая теоретическая сейсмограмма строится для таких же точек расположения приемников, как и в прямой задаче, для которой сформирована очищенная от невертикальных сигналов сейсмограмма. Затем теоретические сейсмограммы должны подвергаться таким же преобразованиям, как и экспериментальные, для сохранения идентичных амплитуд в итоговых сейсмограммах. Теоретическая сейсмограмма в рамках модели плоских волн будет содержать импульсы, пришедшие только по вертикали.

Численное моделирование экспериментальных сейсмограмм и очищение от невертикальных сигналов были представлены в первой части работы [Фонин и др., 2023]. Было проведено моделирование участка горных пород в программном комплексе COMSOL Multiphysics на основе фактических данных по Саратовскому Правобережью [Конценебин и др., 1999].

Выбранная модель «палеорусло» включает восемь слоев толщиной от 8 до 225 м. Параметрические характеристики модели представлены на рис. 3.

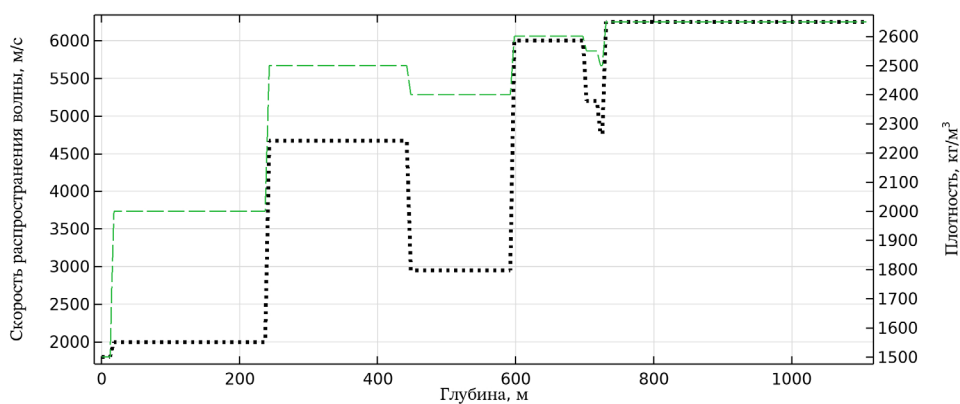


Рис. 3. Зависимость скорости распространения акустической волны (точечная линия) и плотности горных пород (пунктирная линия) от глубины [Конценебин и др., 1999]

Fig. 3. Dependence of acoustic wave propagation velocity (dotted line) and rock density (dashed line) on depth [Kontsenebin et al., 1999]

Результаты и обсуждение

Для определения адекватности построенного метода вычисления теоретической сейсмограммы на основе модели плоских волн нужно провести сравнение экспериментальной сейсмограммы, полученной с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics (численный эксперимент), и теоретической сейсмограммы, рассчитанной в системе MatLab, для одной и той же модели геологического разреза, параметры которой указаны на рис. 3. Результаты сравнения представлены на рис. 4.

Анализ графиков на рис. 4 показывает, что импульсы экспериментальной и теоретической сейсмограмм для первых трех слоев совпадают. Следовательно, можно утверждать, что для одних и тех же параметров слоистой структуры теоретическая сейсмограмма близка к экспериментальной.

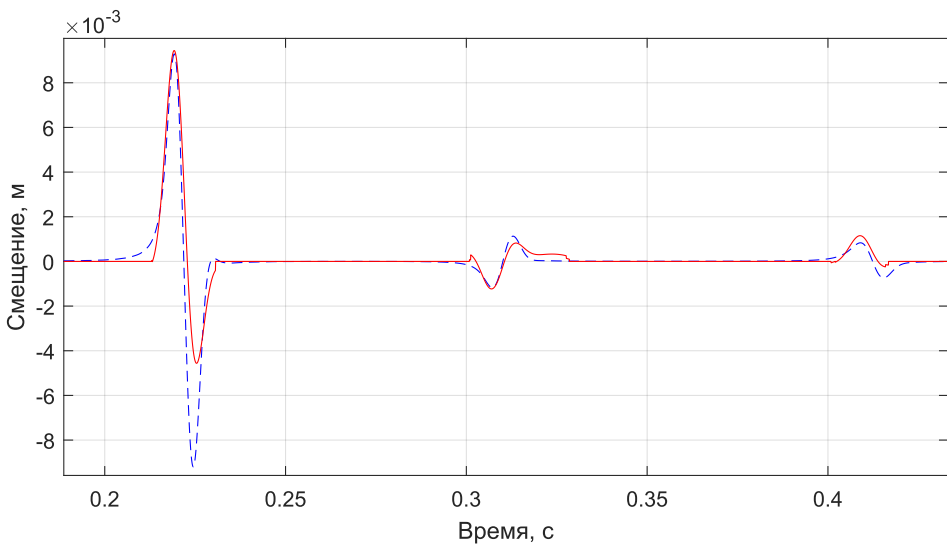
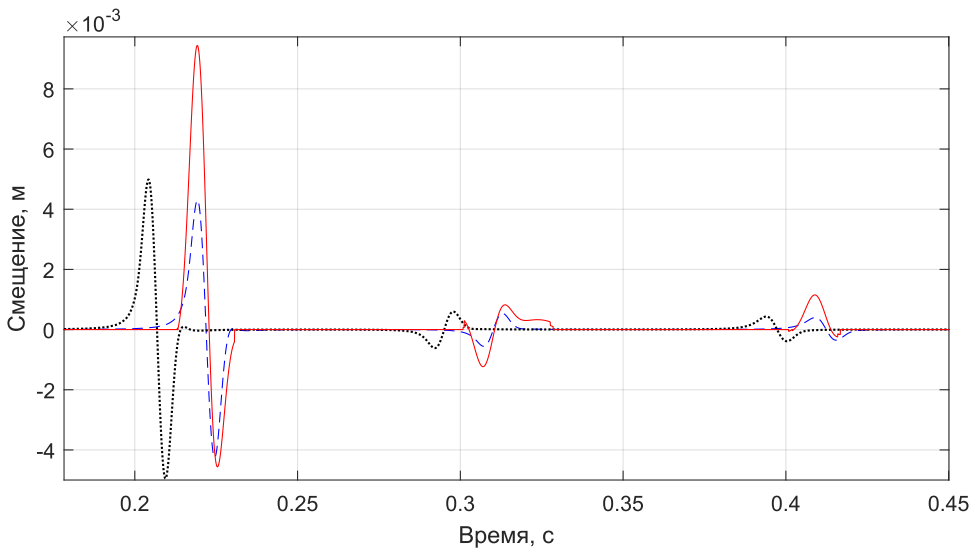


Рис. 4. Экспериментальная (сплошная) и теоретические (пунктирная — для Пр2, штриховая — для Пр1) сейсмограммы, которые рассчитаны для одной и той же модели для первых трех границ, расположенных ниже датчиков

Примечание. На нижнем графике штриховой линией обозначена итоговая теоретическая сейсмограмма после применения метода очищения сейсмограмм от неперпендикулярных импульсов.

Fig. 4. Experimental (solid) and theoretical (dotted — for Пр2, dashed — for Пр1) seismograms calculated for the same model for the first three boundaries located below the sensors

Note. In the lower graph, the dotted line indicates the final theoretical gather after applying the method of cleansing seismograms from non-vertical impulses.

Для решения обратной задачи сейсморазведки, т. е. определения параметров слоев, соответствующих разрезу горных пород, необходимо построить алгоритм автоматического поиска таких параметров. Поэтому с использованием теоретической $S_{th}(t)$ и экспериментальной $S(t)$ сейсмограмм строится целевая функция (функция невязки) в виде суммы квадратов разностей расчетных и измеренных значений амплитуд сейсмосигналов [Линник, 1958; Симончик и др., 2012]:

$$F(a_1, a_2, \dots, a_N) = \sum_{i=1}^P (S_{th}(t_i)^2 - S(t_i)^2), \quad (9)$$

где моменты времени t_i соответствуют максимумам на очищенной от невертикальных сигналов экспериментальной сейсмограмме; $i = 1, 2, \dots, P$.

Глобальный минимум этой функции достигается при таком наборе значений указанных параметров, при которых расчетная сейсмограмма наиболее близка к экспериментальной. Следовательно, можно считать, что подобранные параметры соответствуют реальной слоистой структуре.

На первом этапе расчеты проводятся для первых двух-трех границ (при ограниченных вычислительных ресурсах), а после определения всех акустических параметров, глубин и толщин этих слоев вычисляется форма сейсмоимпульса, прошедшего эти слои, и расчеты повторяются для следующих двух-трех слоев в глубину.

В связи с тем, что теоретическая сейсмограмма зависит от большого числа переменных, может наблюдаться неоднозначность в решении обратной задачи. Поэтому для повышения точности расчетов и исключения вероятности выбора ложных наборов данных предлагается использование трех вертикально расположенных на разной глубине датчиков.

Производя попарное сравнение сейсмограмм с трех датчиков, мы можем получить до шести сейсмограмм, описывающих одну и ту же слоистую структуру. Если какой-то ложный набор параметров будет подходить к первой сейсмограмме, он будет исключен при последующей проверке остальных сейсмограмм. Такой подход позволит также избежать ситуаций интерференции при одновременном поступлении нескольких преотраженных сигналов с большей (или меньшей) интенсивностью.

Использование нескольких сейсмограмм в расчетах приводит к большому увеличению вычислительных действий, что требует применения суперкомпьютеров для более быстрых расчетов.

Заключение

Результаты настоящего исследования показывают, что разработанный алгоритм позволяет получить сейсмограмму, практически совпадающую с экспериментальной, соответствующей реальному разрезу горных пород.

Поскольку теоретическая сейсмограмма зависит от геологических параметров горных пород, таких как толщины, плотности и скорости распространения акустических волн в породах, а также добротностей этих сред и коэффициентов рассеяния, то при максимальном совпадении теоретической кривой с экспериментальной подобранные параметры также будут совпадать с параметрами реального разреза горных пород.

Добиться максимального совпадения сейсмограмм позволяет метод наименьших квадратов, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений теоретической функции от экспериментальных данных.

Таким образом, разработанный метод сейсморазведки обеспечивает совершенствование теоретических основ разведочной геофизики и развитие новых возможностей для производства на практике, что является актуальной задачей [Di и др., 2019; Wei и др., 2019; Фонин и др., 2020; Vačić и др., 2020; Monk, 2020; Bashir, 2022; Trofimov и др., 2022] из-за роста требований к качеству и достоверности получаемых результатов при сейсморазведке и необходимости изучения более сложных геологических структур.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Акустика // COMSOL Multiphysics. <https://www.comsol.ru/acoustics-module> (дата обращения: 29.04.2020).
- Бреховских Л. М. 1973. Волны в слоистых средах. М.: Наука. 343 с.
- Дьяконов В. П. 2005. MATLAB 6.5 SP1/7.0 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров. М.: СОЛОН-Пресс. 576 с.
- Зацепин А. Ф. 2005. Акустический контроль: в 2 ч. Часть 1. Введение в физику акустического контроля. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 88 с.
- Исакович М. А. 1973. Общая акустика: учеб. пос. для физ. спец. вузов. М.: Наука. 495 с.
- Квеско Б. Б., Квеско Н. Г. 2018. Физика пласта: учеб. пособие. М.: Инфра-Инженерия. 228 с.
- Конценебин Ю. П., Рыскин М. И., Балабанов В. Г., Михеев С. И., Коробова Л. А. 1999. Геофизическое моделирование ловушек нефти и газа // Труды научно-исследовательского института геологии Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. Новая серия. Саратов: Колледж. 142 с.
- Линник Ю. В. 1958. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз. 333 с.
- Михайленко Б. Г., Эпов М. И. (отв. ред.). 2010. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли: монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 310 с.
- Симончик К. К., Тропченко А. Ю., Хитров М. В. 2012. Цифровая обработка сигналов: учеб. пос. СПб.: СПбГУ ИТМО. 108 с.
- Фонин А. А., Сучков С. Г., Михеев С. И., Николаевцев В. А., Сучков Д. С. 2020. Новый метод определения акустических параметров геологического разреза // Акустика океана: доклады XVII Школы-семинара им. акад. Л. М. Бреховских, совмещенной с XXXIII сессией Российского акустического общества (19–23 октября 2020 г., Москва, Россия). С. 286–293. <https://doi.org/10.29006/978-5-9901449-5-8-46>
- Фонин А. А., Сучков С. Г., Николаевцев В. А., Михеев С. И. 2023. Математическое моделирование нового метода обработки сейсмосигнала на примере разреза Саратовского Правобережья. Часть 1 // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 9. № 1 (33). С. 92–106. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-1-92-106>

- Aster R. C., Borchers B., Thurber C. H. 2018. *Parameter Estimation and Inverse Problems*. 3rd ed. Netherlands: Elsevier Science. 404 p. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-02458-3>
- Bačić M., Librić L., Kačunić D. J., Kovačević M. S. 2020. The usefulness of seismic surveys for geotechnical engineering in karst: Some practical examples // *Geosciences*. Vol. 10. No. 10. Article 406. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100406>
- Bashir Ya., Babasafari A. A., Arshad A. R. M., Alashloo S. Ya. M., Latiff A. H. A., Hamidi R., Rezaei Sh., Ratnam T., Sambo Ch., Ghosh D. 2022. *Seismic Imaging Methods and Applications for Oil and Gas Exploration*. Netherlands: Elsevier Science. 308 p. <https://doi.org/10.1016/C2021-0-00166-8>
- Bracewell R. N. 1986. *The Fourier Transform and Its Applications*. 2nd ed., revised. McGraw-Hill Book Company. 486 p.
- Di H., Gao D., AlRegib Gh. 2019. Developing a seismic texture analysis neural network for machine-aided seismic pattern recognition and classification // *Geophysical Journal International*. Vol. 218. No. 2. Pp. 1262–1275. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz226>
- Monk D. J. 2020. *Survey Design and Seismic Acquisition for Land, Marine, and In-between in Light of New Technology and Techniques*. USA: Society of Exploration Geophysicists. 214 p. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803713>
- Trofimov V. L., Khaziev F. F., Trofimova A. V. 2022. *Oil and Gas Reservoir Prospecting and Exploration: High-Resolution Seismic (HRS) Techniques and Technology*. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG. XXIII, 419 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-84389-2>
- Wang Ya. 2016. *Seismic Inversion: Theory and Applications*. UK: Wiley-Blackwell. 256 p.
- Wei X., Yang Z.-F., Yan X.-F. 2019. Multi-scale issue in seismic exploration and its research progress // *Progress in Geophysics*. Vol. 34. No. 6. Pp. 2353–2360. <https://doi.org/10.6038/pg2019DD0239>

References

- COMSOL Multiphysics. (n.d.). *Acoustics module*. Retrieved April 29, 2020, from <https://www.comsol.ru/acoustics-module> [In Russian]
- Brekhovskikh, L. M. (1973). *Waves in layered structures*. Nauka. [In Russian]
- Dyakov, V. P. (2005). *MATLAB 6.5 SP1/7.0 + Simulink 5/6. Signal processing and filter design*. SOLON-Press. [In Russian]
- Zatsepin, A. F. (2005). *Acoustic control: in 2 parts. Part 1. Introduction to the physics of acoustic control*. Ural State Technical University. [In Russian]
- Isakov, M. A. (1973). *General acoustics*. Nauka. [In Russian]
- Kvesko, B. B., & Kvesko, N. G. (2018). *Physics of reservoir*. Infra-Inzheneriya. [In Russian]
- Kontsenybin, Yu. P., Ryskin, M. I., Balabanov, V. G., Mikheyev, S. I., & Korobova, L. A. (1999). Geophysical modeling of oil and gas traps. *Proceedings of the Research Institute of Geology of the Saratov State University. New Series*. Kolledzh. [In Russian]
- Linnik, Yu. V. (1958). *The method of least squares and the foundations of the mathematical-statistical theory of processing observations*. Fizmatgiz. [In Russian]
- Mikhailenko, B. G., & Eпов, M. I. (Eds.). (2010). *Methods for direct and inverse problems of seismology, electromagnetism, and experimental investigations in problems of studying geodynamic processes in the Earth's crust and upper mantle*. Siberian Branch of the RAS. [In Russian]

- Simonchik, K. K., Tropchenko, A. Yu., & Khitrov, M. V. (2012). *Digital signal processing*. SPbGU ИТМО. [In Russian]
- Fonin, A. A., Suchkov, S. G., Mikheev, S. I., Nikolaevtsev, V. A., & Suchkov, D. S. (2020). New method of geological profile acoustic parameters determination. *Acoustics of the Ocean*, 286–293. <https://doi.org/10.29006/978-5-9901449-5-8-46> [In Russian]
- Fonin, A. A., Suchkov, S. G., Nikolayevtsev, V. A., & Mikheyev, S. I. (2023). Mathematical modeling of a new method for processing a seismic signal on the example of a section of the Saratov right bank. Part 1. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 9(1), 92–106. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-1-92-106> [In Russian]
- Aster, R. C., Borchers, B., & Thurber, C. H. (2018). *Parameter estimation and inverse problems* (3rd ed.). Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-02458-3>
- Bačić, M., Librić, L., Kačunić, D. J., & Kovačević, M. S. (2020). The usefulness of seismic surveys for geotechnical engineering in karst: Some practical examples. *Geosciences*, 10(10), Article 406. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100406>
- Bashir, Ya., Babasafari, A. A., Arshad, A. R. M., Alashloo, S. Ya. M., Latiff, A. H. A., Hamidi, R., Rezaei, Sh., Ratnam, T., Sambo, Ch., & Ghosh, D. (2022). *Seismic imaging methods and applications for oil and gas exploration*. Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/C2021-0-00166-8>
- Bracewell, R. N. (1986). *The fourier transform and its applications* (2nd ed., revised). McGraw-Hill Book Company.
- Di, H., Gao, D., & AlRegib, Gh. (2019). Developing a seismic texture analysis neural network for machine-aided seismic pattern recognition and classification. *Geophysical Journal International*, 218(2), 1262–1275. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz226>
- Monk, D. J. (2020). *Survey design and seismic acquisition for land, marine, and in-between in light of new technology and techniques*. Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803713>
- Trofimov, V. L., Khaziev, F. F., & Trofimova, A. V. (2022). *Oil and gas reservoir prospecting and exploration: High-resolution seismic (HRS) techniques and technology*. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-84389-2>
- Wang, Ya. (2016). *Seismic inversion: Theory and applications*. Wiley-Blackwell.
- Wei, X., Yang, Z.-F., & Yan, X.-F. (2019). Multi-scale issue in seismic exploration and its research progress. *Progress in Geophysics*, 34(6), 2353–2360. <https://doi.org/10.6038/pg-2019DD0239> [In Chinese]

Информация об авторах

Анатолий Александрович Фонин, аспирант, кафедра геофизики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия
fonin.a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5049-4243>

Сергей Германович Сучков, доктор физико-математических наук, профессор, руководитель научно-технологического центра «Микро- и наноэлектроника», Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия
suchkov.s.g@mail.ru

Виктор Андреевич Николаевцев, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, научно-технологический центр «Микро- и наноэлектроника», Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия
nikolaevcev@yandex.ru

Сергей Иванович Михеев, доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра геофизики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия
s.mixeev@gmail.com

Information about the authors

Anatoly A. Fonin, Postgraduate Student, Department of Geophysics, National Research Saratov State University, Saratov, Russia
fonin.a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5049-4243>

Sergey G. Suchkov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Scientific and Technological Center “Micro- and Nanoelectronics”, National Research Saratov State University, Saratov, Russia
suchkov.s.g@mail.ru

Victor A. Nikolayevtsev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Lead Engineer, Scientific and Technological Center “Micro- and Nanoelectronics”, National Research Saratov State University, Saratov, Russia
nikolaevcev@yandex.ru

Sergey I. Mikheyev, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor, Department of Geophysics, National Research Saratov State University, Saratov, Russia
s.mixeev@gmail.com