

Математическое моделирование нового метода обработки сейсмосигнала на примере разреза Саратовского Правобережья. Часть 1

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 представлен новый способ сейсморазведки, который включает два приемника акустических сигналов, углубленных в породу друг под другом на некотором расстоянии. Данные приемники записывают сейсмограммы — акустические сигналы, источником которых может служить естественная сейсмическая активность Земной коры или целенаправленные источники акустических сигналов, например взрыв. Выполнено моделирование прямой задачи сейсморазведки с применением программных комплексов COMSOL Multiphysics и MatLab. Полученные при моделировании сейсмограммы совмещаются друг с другом со смещением на время задержки входного сейсмоимпульса между приемниками и складываются. При этом сигналы, пришедшие по вертикали, на суммарной сейсмограмме усиливают друг друга, а невертикальные сигналы ослабляются. Для математического моделирования вычисляется корреляционная функция сейсмограмм. Приведены результаты моделирования распространения акустической волны в горных породах и пример обработки сейсмограмм по предложенному алгоритму. Представленные результаты показывают, что новый способ расположения приемников и предложенный метод обработки сейсмограмм позволяют получить очищенную сейсмограмму, которая может быть использована для решения обратной задачи по определению параметров геологической среды.

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 1 // Вестник Тюменского государствен-

ного 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>

Поступила 20.02.2023; одобрена 27.03.2023; принята 31.03.2023

Mathematical modeling of a new method for processing a seismic signal on the example of a section of the Saratov right bank. Part 1

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

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

Abstract. The paper presents a new method of seismic exploration, which includes two receivers of acoustic signals, deepened into the rock one under the other at some distance. These receivers record seismograms which are the acoustic signals, the source of which can be the natural seismic activity of the Earth's crust or targeted sources of acoustic signals, such as an explosion. Simulation of the direct problem of seismic exploration was performed using the COMSOL Multiphysics and MatLab software packages. The seismograms obtained during the simulation are combined and added with each other with the on the delay time shift of the input seismic pulse between the receivers. In this case, the signals that came along the vertical, “amplify” each other on the total seismogram, and non-vertical signals are damped. The correlation function of seismograms was obtained for mathematical simulation. The results of modeling the propagation of an acoustic wave in rocks and an example of processing seismograms according to the proposed algorithm are given. The presented results show that the new method of receiver location and the method of processing seismograms make it possible to obtain a cleared seismogram that can be used to solve the inverse problem of determining the parameters of the geological environment.

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 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>

Received February 20, 2023; Reviewed March 27, 2023; Accepted March 31, 2023

Введение

На сегодняшний день сейсморазведка играет большую роль во многих отраслях производства. Даже с учетом того, что сейсморазведка зародилась еще в 1920-х гг. и уже более ста лет остается главным способом изучения глубинного строения Земли, сейсмической активности местности и исследования месторождений полезных ископаемых, разработка новых методов остается актуальной задачей геологии [Вакуленко и др., 2021; Bashir и др., 2022; Di и др., 2019; El-Raouf и др., 2021; Monk, 2020; Trofimov и др., 2022; Wei и др., 2019].

Сейсмические методы позволяют не только изучить глубины расположения границ раздела сред горных пород, но и их формы и физические свойства подповерхностных слоев Земли по отражениям звуковых волн, распространяющихся через слои горных пород [Бреховских, 1973]. Разница в плотностях и скоростях акустической волны в породах может быть обусловлена такими параметрами, как литология, пористость, наличие порового флюида, степень насыщения и диагенез.

Зависимость скорости распространения акустической волны в породе от этих параметров уже достаточно хорошо изучена [Бреховских, 1973; Квеско, Квеско, 2018; Урупов, 1966; Vasić и др., 2020]. По этой причине основными направлениями развития сейсморазведки являются методы увеличения точности исследований, сокращение времени и стоимости полевых работ, повышение производительности используемого оборудования или разработка новых математических методов для более точных и быстрых расчетов.

В первой части работы рассматривается новый способ сейсморазведки [Фонин и др., 2020] и моделирование прямой задачи с применением программных комплексов COMSOL Multiphysics и MatLab. Во второй части рассматривается решение обратной задачи, состоящей в определении акустических параметров слоев по сейсмограммам.

Методы

Под прямой задачей исследования будем понимать численный эксперимент, в результате которого получаем сейсмограмму, соответствующую заранее известным параметрам среды [Конценебин и др., 1999].

Прямая задача решается на основе математической модели, использующей уравнения и граничные условия для акустических волн в слоистой среде [Бреховских, 1973] с учетом наклона границ, посредством компьютерного моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics, который используется во всем мире инженерами и исследователями для описания реальных физических явлений.

Обратная задача сейсморазведки заключается в определении параметров геологического разреза по заданной (экспериментальной) сейсмограмме.

Очевидно, наибольший интерес вызывает решение обратной задачи сейсморазведки, т. к. на практике регистрируются сейсмограммы малоизученных местностей для исследования их свойств и расположения границ раздела слоев. Представленные результаты являются первым этапом в решении обратной задачи.

Метод вертикальных приемников

Суть предлагаемого нового метода обработки сейсмосигналов [Фонин и др., 2020] заключается в применении не менее двух приемников сигнала, расположенных в геологической структуре на вертикальной линии, один под другим на известном расстоянии друг от друга. Приемники следует размещать ниже зоны малых скоростей (ЗМС) вследствие того, что ЗМС является верхним слоем земной породы, характеризующимся, как правило, небольшими значениями скоростей сейсмических волн и сильным их затуханием. Также в ЗМС возможно наличие различных артефактов в приповерхностной зоне, что осложняет проведение сейсморазведки.

На рис. 1 изображена схема размещения сейсмоприемников по предлагаемому методу с возбуждением сейсмосигнала поверхностным взрывом.

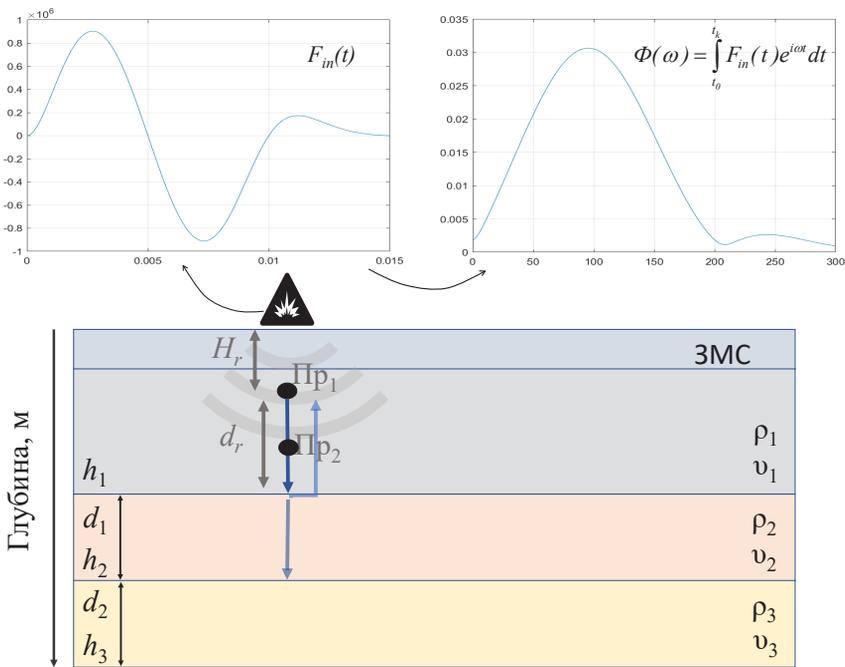


Рис. 1. Схема исследуемого участка горных пород

Примечание. Пр1 — верхний приемник, Пр2 — нижний приемник; H_r — глубина расположения первого датчика, d_r — расстояние от верхнего датчика до первой границы раздела пород; h_1, h_2, h_3 — глубины расположения границ разделов горных пород, d_1, d_2 — мощности (толщины) слоев, v_1, v_2, v_3 — скорости распространения акустической волны в породах, ρ_1, ρ_2, ρ_3 — плотности горных пород в слоях.

Fig. 1. Scheme of the studied area of rocks

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; h_1, h_2, h_3 are the depths of the location of the rock boundaries, d_1, d_2 are the thicknesses (thicknesses) of the layers, v_1, v_2, v_3 are the acoustic wave propagation velocities in the rocks, ρ_1, ρ_2, ρ_3 are the rock densities in the layers.

При отражении от границ раздела сред горных пород зондирующий сейсмоимпульс частично возвращается к поверхности и приемники регистрируют отраженные сейсмоимпульсы. Сейсмограмма представляет собой зависимость упругих смещений сейсмических волн от времени в точке расположения приемника, выраженную в пропорциональном электрическом напряжении сейсмодатчика. Отраженные сейсмоимпульсы приходят на сейсмодатчики не только от различных участков неидеальных границ раздела слоев, но также и от различных артефактов, которые находятся на удалении от вертикали расположения приемников. Такие сейсмоимпульсы создают паразитные сигналы на сейсмограмме, наличие которых может привести к ошибочной интерпретации сейсмограммы. Для устранения таких паразитных сигналов разработан представляемый метод двух вертикальных приемников, который состоит в следующем:

1. По времени начального импульса сейсмограммы на приемниках определяют время t_0 распространения сигнала по вертикали между приемниками Пр1 и Пр2 с высокой точностью. Для любых принятых невертикальных (паразитных) сигналов разница времен между соответствующими максимумами на сейсмограммах будет больше t_0 .
2. С помощью приемника Пр2 измеряют амплитуду и форму сейсмоимпульса, вошедшего в геологическую структуру, и снимают сейсмограммы принятых отраженных от границ раздела слоев импульсов. Приемником Пр1 регистрируют отраженные сейсмоимпульсы, но с задержкой на время прохождения волной расстояния между приемниками. Следовательно, сигнал на Пр1 слабее и с меньшим соотношением сигнал/шум. С целью повышения соотношения сигнал/шум используется метод накопления сигнала [Симончик и др., 2012].

Для выявления и устранения паразитных импульсов необходимо сместить одну сейсмограмму относительно другой на время t_0 и сравнить их. При этом полезные импульсы, пришедшие по вертикали на оба приемника, будут иметь совпадающие (в пределах длительности импульса) максимумы, а максимумы паразитных импульсов будут смещены относительно друг друга. Значит, при сложении смещенных сейсмограмм полезные сигналы увеличиваются, а паразитные (невертикальные) сигналы не возрастают и могут быть численно устранены.

Для математического моделирования требуется точное вычисление суммарной сейсмограммы, которое проводится в виде корреляционной функции [Ахизер, Пелетминский, 1977]:

$$S(t) = \int_{t_n}^{t_k} S_1(t' - t_0) S_2(t - t') dt', \quad (1)$$

где $S_1(t)$ и $S_2(t)$ — сейсмограммы, принятые приемниками Пр1 и Пр2 соответственно; t_n — время начала сейсмограммы; t_k — время конца сейсмограммы.

Корреляционная функция будет иметь максимумы для сигналов, пришедших по вертикали, а для невертикальных сигналов корреляционная функция будет иметь малые значения.

Таким образом, $S(t)$ — очищенная от паразитных (невертикальных) сигналов сейсмограмма, полученная в результате сейсморазведки, которая несет в себе информацию о геологической структуре вертикально под датчиками.

Моделирование обработки сейсмосигнала в конкретном разрезе

Моделирование обработки сейсмосигналов предложенным методом двух вертикальных приемников для участка горных пород проведено на основе изучения фактических данных по Саратовскому Правобережью [Конценебин и др., 1999] с помощью разработанных программ в системе MatLab и составленной мультифизической модели в системе COMSOL Multiphysics.

Характеристики, используемые при моделировании, были взяты из работы [Конценебин и др., 1999], которая посвящена изучению теоретических и методических основ геофизического моделирования ловушек нефти и газа, решению прямой и обратной задачи для реальных разрезов с различными физико-геологическими параметрами.

Выбранная модель «палеоруло» является теоретической, составленной на основе обобщения фактических данных. Модель включает восемь слоев толщиной от 8 до 225 м. Параметрические характеристики модели представлены на рис. 2.

Моделирование производилось в программном комплексе COMSOL Multiphysics [Ground Motion after Seismic Event; Isotropic-Anisotropic Sample; Propagation of Seismic Waves through Earth] с помощью модуля Acoustics (Акустика) с настраиваемым интерфейсом и функциональностью, которая оптимизирована для анализа проблем акустики и вибрации. Этот модуль решает задачи в областях акустики конструкций, геометрической акустики, аэроакустики, термовязкостной акустики, рассчитывает давления и упругие волны в пористых материалах и др.

В разработанной в системе COMSOL Multiphysics программе была реализована двумерная акустическая модель слоистой структуры горных пород. Мощности слоев выбранного месторождения и характеристики горных пород указаны на рис. 2. Помимо плотностей и скоростей продольной волны в слоях в модели были использованы также скорости поперечных волн и добротности.

Вертикальные границы области моделирования выбраны на расстоянии 500 м от точки взрыва, что является достаточным для пренебрежения неvertикальными сигналами от более удаленных неоднородностей среды. Для того чтобы акустическая волна не отражалась от боковых границ и от последней нижней границы, они были смоделированы как Absorbing Layer (Поглощающий слой). Данные слои поглощают поперечные и продольные волны и не отражают их обратно в среду.

В модели считается, что при взрывной генерации сейсмоимпульса на верхней границе в точке приложена сила:

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

где T_{imp} — время импульса, с; F_{imp} — центральная частота, Гц; t — время, с.

Выражение (2) получено на основе аппроксимации формы первого импульса в экспериментальных сейсмограммах. Зависимость величины возбуждающей силы (2) от времени и ее спектр приведены на рис. 3.

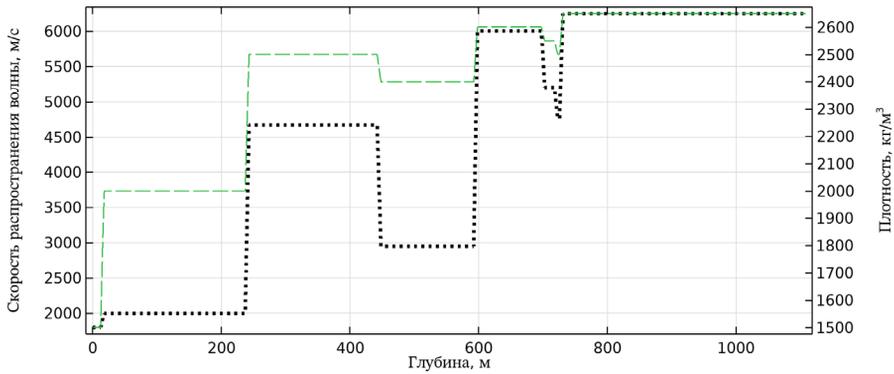


Рис. 2. Зависимость скорости распространения акустической волны (точечная линия) и плотности горных пород (пунктирная линия) от глубины [Конценебин и др., 1999]

Fig. 2. Dependence of acoustic wave propagation velocity (dotted line) and rock density (dashed line) on depth [Kontsenebin et al., 1999]

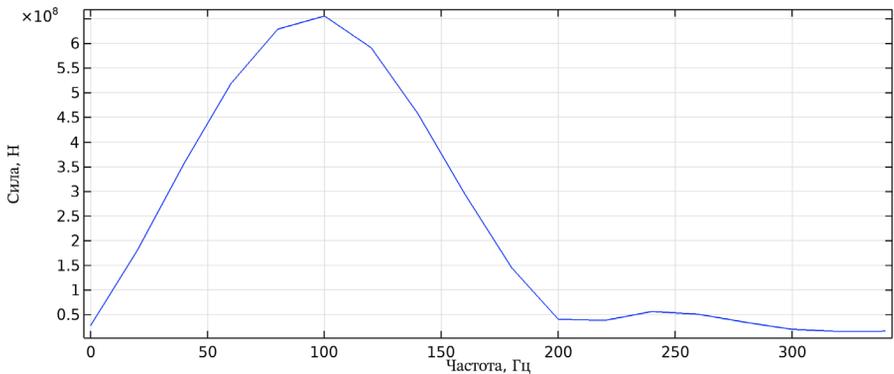
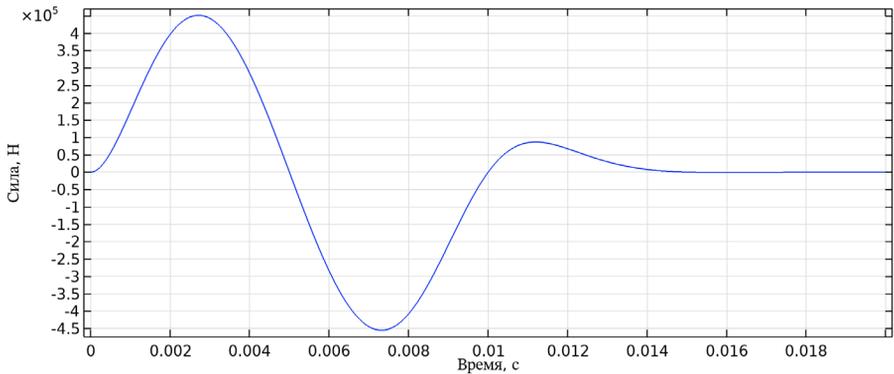


Рис. 3. Форма (сверху) и спектр (снизу) входного импульса

Fig. 3. Shape (top) and spectrum (bottom) of the input pulse

В модели глубина ЗМС принята 15 м, а сейсмоприемники располагаются на глубине 50 и 80 м на вертикальной линии (рис. 4).

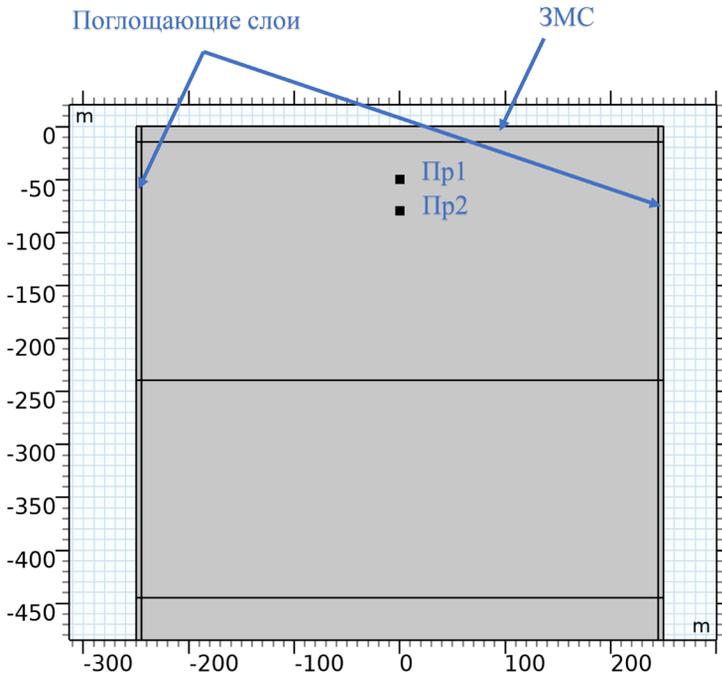


Рис. 4. Область моделирования и расположение приемников Пр1 и Пр2

Fig. 4. Modeling area and location of receivers Пр1 and Пр2

Результаты и обсуждение

Далее (рис. 5) приведены результаты моделирования распространения акустической (сейсмической) волны при взрывном возбуждении в различные моменты времени в восьмислойной структуре с параметрами слоев, представленными на рис. 2.

Зависимость от времени акустических смещений среды в точках расположения приемников для многослойной структуры представлена на рис. 6.

В многослойной структуре с наклонными границами вид модельных сейсмограмм значительно сложнее и включает отклики от неvertикальных сигналов.

Обработка модельных сейсмограмм производится разработанной в системе MatLab программой, реализующей изложенный выше алгоритм. Программа вычисляет время распространения волны между приемниками (t_0), затем смещает сейсмограмму с нижнего приемника на полученное значение t_0 . Следующим шагом программа находит импульсы, которые совпали в пределах половины длительности сейсмоимпульса, а несовпадающие импульсы удаляет. На последнем этапе формируется очищенная от неvertикальных сигналов суммарная сейсмограмма.

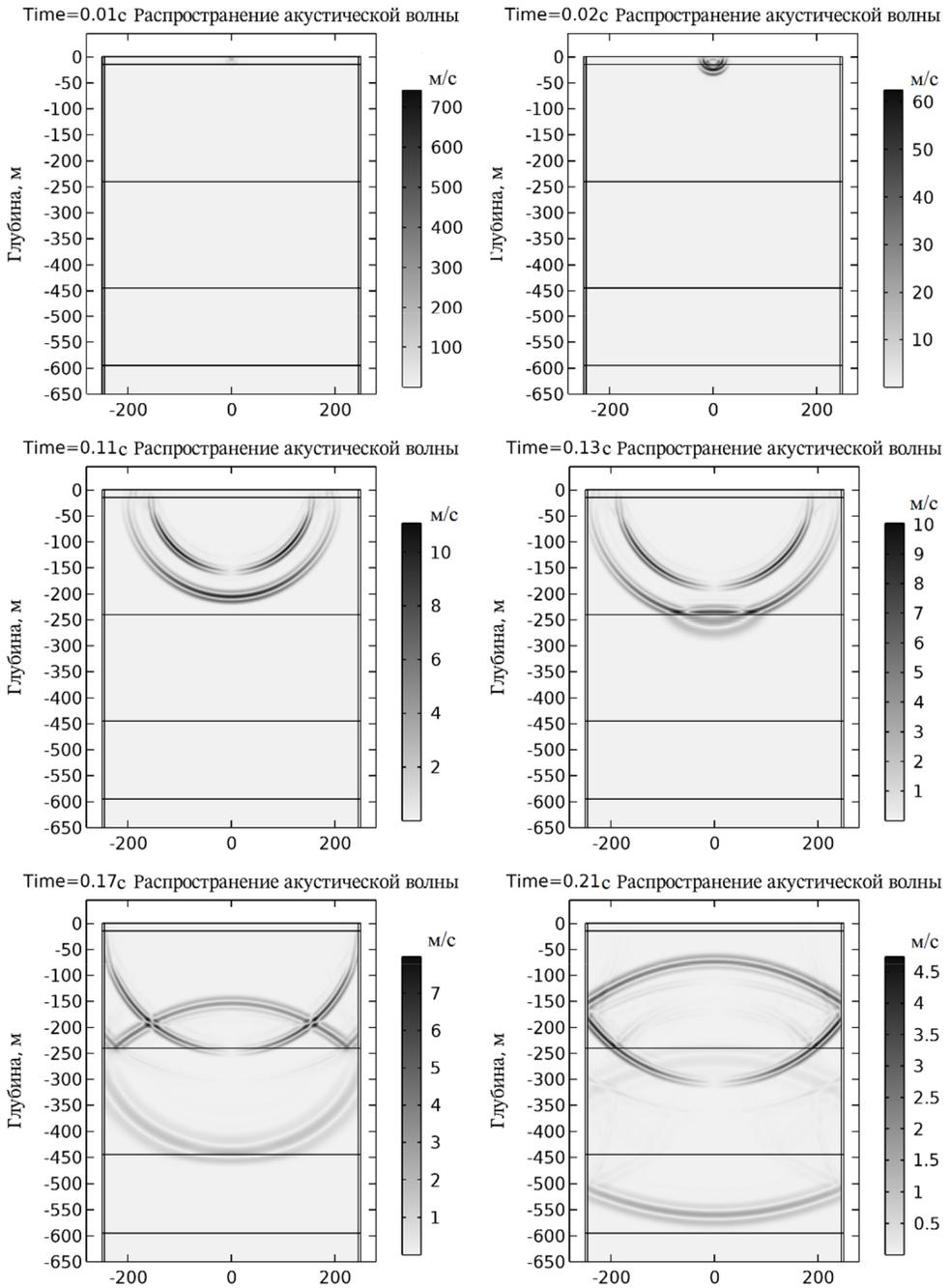


Рис. 5. Результат моделирования распространения акустической волны в различные моменты времени

Fig. 5. The result of modeling the propagation of an acoustic wave at different times

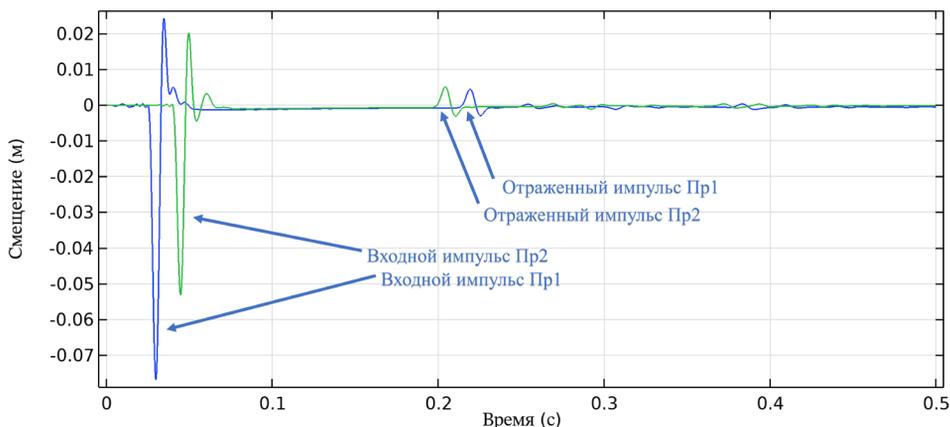


Рис. 6. Зависимость акустических смещений среды от времени в точках расположения приемников

Fig. 6. Dependence of the acoustic displacements of the structure on time at the points of location of the receivers

Результаты работы данной программы для структуры, параметры которой указаны на рис. 2, представлены на рис. 7. На графиках показаны участки сейсмограмм с момента прихода на приемники первого отраженного сигнала без входных импульсов для большей информативности.

Анализ результатов, представленных на рис. 7, показывает, что при смещении сейсмоимпульсов по времени на t_0 на графиках имеются совпадающие и посторонние сигналы, которые приходят на приемники в различное время (рис. 7б). Так как сейсмоприемники расположены ниже ЗМС, то акустическая волна, распространяясь после отражений от нижележащих границ к поверхности, также отражается от слоя ЗМС и повторно приходит на датчики, образуя посторонние сигналы на сейсмограмме.

Алгоритм программы позволяет определить совпадающие максимумы и удалить посторонние импульсы, что представлено на рис. 7в.

Согласно параметрам геологического разреза горных пород, которые представлены на рис. 2, можно сделать вывод, что сохранились только импульсы, действительно соответствующие времени прихода акустического сигнала по вертикали.

Несмотря на то что модель включает восемь слоев (рис. 2), на итоговой сейсмограмме (рис. 7г) можно наблюдать только пять ярко выраженных импульсов. Причина наличия меньшего количества импульсов, чем границ раздела пород, заключается в том, что первый слой ЗМС, расположенный выше приемников, исключается из итоговой сейсмограммы, а также в том, что шестой и седьмой слой имеют малую толщину (20 и 8 м) по сравнению с основной длиной акустической волны (55 м). В связи с этим время прихода импульсов, отраженных от последних трех границ, практически не отличается в пределах длительности сейсмоимпульса. При отражении от границ с большим акустическим импедансом фаза отраженной волны изменяется на π , поэтому импульс, отраженный от шестой границы, имеет отрицательную полярность.

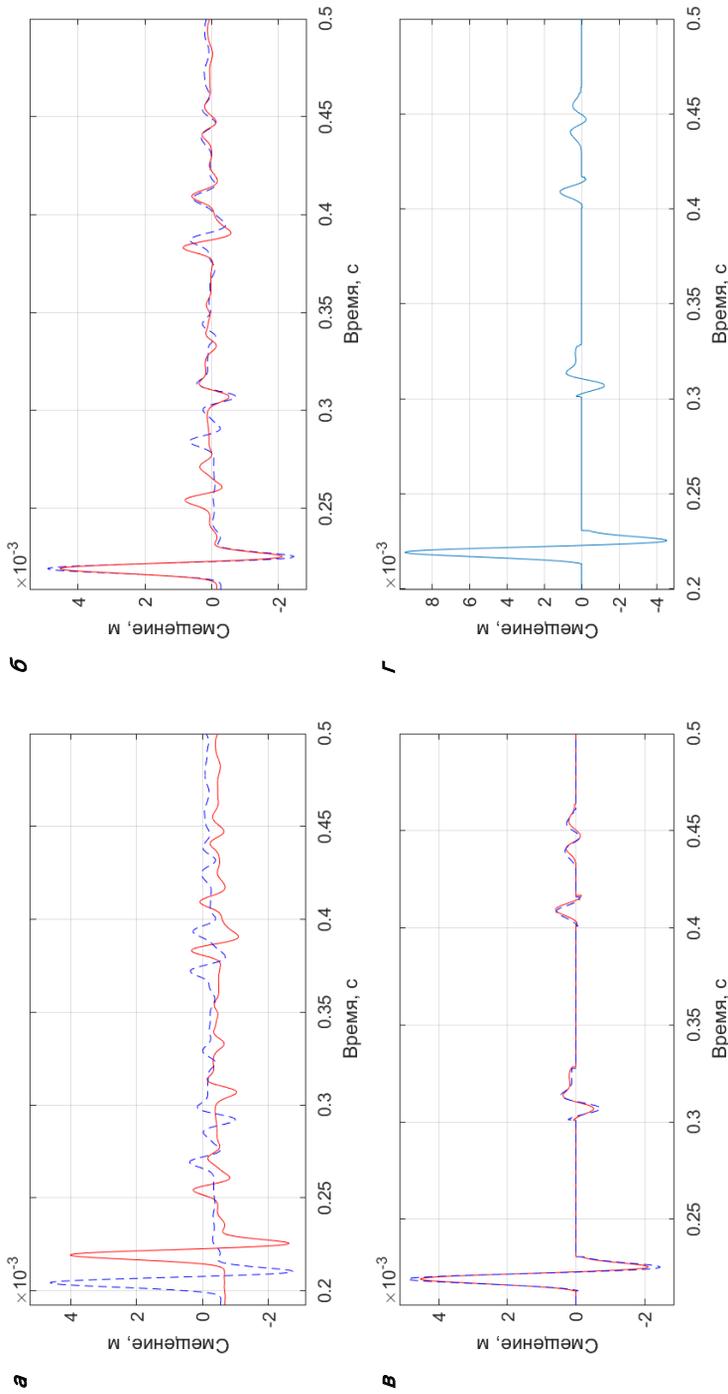


Рис. 7. Пример обработки сейсмограмм для нового метода сейсморазведки

Примечание. Пунктирной линией обозначены сейсмограммы с нижнего приемника, сплошной линией — с верхнего приемника; а — исходные сейсмограммы; б — смещение по времени сейсмограммы нижнего приемника к сейсмограмме верхнего; в — исключение посторонних импульсов; г — итоговая сейсмограмма.

Fig. 7. An example of processing seismicograms for a new seismic method

Note. The dashed line indicates the seismicograms from the lower receiver, the solid line — from the upper receiver; а — initial seismicograms; б — shift in time of the seismicogram of the lower receiver to the seismicogram of the upper one; в — exclusion of extraneous impulses; г — final seismicogram.

Расчеты времени прихода сигнала в режиме плоской волны на приемник Пр1, учитывающие только толщины слоев и скорость распространения акустической волны в породах, показывают, что время прихода импульсов от второй, третьей, четвертой, пятой, шестой и седьмой границ соответственно равно примерно 0,216, 0,304, 0,405, 0,440, 0,448 и 0,451 с.

Время импульсов, отраженных от последних трех границ, практически не отличается, что могло привести к слиянию нескольких импульсов вместе. Помимо этого, стоит учитывать, что при отражении от границ с большим акустическим импедансом фаза отраженной волны изменяется на π . Как видим, импульс волны, отраженной от шестой границы, присутствует на итоговой сейсмограмме, и его максимум расположен в отрицательной области между двумя соседними положительными импульсами.

Расчитанное время соответствует импульсам, которые сохранились в результате работы программы.

Заключение

В настоящей работе рассмотрен метод математического моделирования и обработки сейсмограмм в геологическом разрезе, получаемых новым способом сейсморазведки, который заключается:

- 1) в использовании двух углубленных в горную породу приемников, расположенных на одной вертикальной линии один под другим на некотором известном расстоянии друг от друга;
- 2) применении нового алгоритма обработки зарегистрированных приемниками сейсмограмм с целью получения результирующей сейсмограммы, очищенной от посторонних (паразитных) импульсов.

Представленные результаты показывают, что новый способ расположения приемников и предложенный метод обработки сейсмограмм позволяют получить очищенную сейсмограмму, которая может быть использована для решения обратной задачи по определению параметров геологической среды с высокой точностью. Этому вопросу будет посвящена вторая часть данной работы.

Список источников

- Акустика // COMSOL Multiphysics. <https://www.comsol.ru/acoustics-module> (дата обращения: 29.04.2020).
- Ахиезер А. И., Пелетминский С. В. 1977. Методы статистической физики. М.: Наука. 111 с.
- Бреховских Л. М. 1973. Волны в слоистых средах. М.: Наука. 343 с.
- Вакуленко С. А., Понимаскин А. И., Токарев М. Ю., Горбачев С. В., Гурвич Л. А. 2021. Применение технологии многоканального анализа поверхностных волн (MASW) для решения задач оценки свойств придонных отложений по результатам 2D/3D сейсмической съемки с донным оборудованием на шельфе Печорского моря // Инженерная и рудная геофизика 2021: материалы 17-й научно-практической конференции и выставки (26–30 апреля 2021 г., Геленджик, Россия). 9 с. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152188>

- Квеско Б. Б., Квеско Н. Г. 2018. Физика пласта: учеб. пос. 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.
- Симончик К. К., Тropicенко А. Ю., Хитров М. В. 2012. Цифровая обработка сигналов: учеб. пос. СПб.: СПбГУ ИТМО. 108 с.
- Урупов А. К. 1966. Изучение скоростей в сейсморазведке. М.: Недра. 224 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>
- Bačić M., Librić L., Kačić 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>
- 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>
- El-Raouf A. A., Iqbal I., Meister Ju., Abdelrahman K., Alzahrani H., Badran O. M. 2021. Earthflow reactivation assessment by multichannel analysis of surface waves and electrical resistivity tomography: A case study // Open Geosciences. Vol. 13. No. 1. Pp. 1328–1344. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0310>
- Ground Motion after Seismic Event: Scattering off a Small Mountain // COMSOL Multiphysics. <https://www.comsol.com/model/ground-motion-after-seismic-event-scattering-off-a-small-mountain-78241> (дата обращения: 08.07.2021).
- Isotropic-Anisotropic Sample: Elastic Wave Propagation // COMSOL Multiphysics. <https://www.comsol.com/model/isotropic-anisotropic-sample-elastic-wave-propagation-78231> (дата обращения: 08.07.2021).
- 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>
- Propagation of Seismic Waves through Earth // COMSOL Multiphysics. <https://www.comsol.com/model/propagation-of-seismic-waves-through-earth-90381> (дата обращения: 08.07.2021).
- 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>
- 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]
- Akhiyezer, A. I., & Peletminskiy, S. V. (1977). *Methods of statistical physics*. Nauka. [In Russian]
- Brekhovskikh, L. M. (1973). *Waves in layered structures*. Nauka. [In Russian]
- Vakulenko, S. A., Ponimaskin, A. I., Tokarev, M. Yu., Gorbachev, S. V., & Gurvich, L. A. (2021). MASW application for near-surface site characterization of 2D/3D OBN seismic survey on Pechora Sea shelf. *Proceedings of the Engineering and Mining Geophysics 2021* (April 26–30, 2021, Gelendzhik, Russia). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152188> [In Russian]
- Kvesko, B. B., & Kvesko, N. G. (2018). *Physics of reservoir*. Infra-Inzheneriya. [In Russian]
- Kontsenebin, 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]
- Simonchik, K. K., Tropchenko, A. Yu., & Khitrov, M. V. (2012). *Digital signal processing*. SPbGU ITMO. [In Russian]
- Urupov, A. K. (1966). *The study of velocities in seismic exploration*. Nedra. [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]
- 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>
- 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>
- El-Raouf, A. A., Iqbal, I., Meister, Ju., Abdelrahman, K., Alzahrani, H., & Badran, O. M. (2021). Earthflow reactivation assessment by multichannel analysis of surface waves and electrical resistivity tomography: A case study. *Open Geosciences*, 13(1), 1328–1344. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0310>
- COMSOL Multiphysics. (n.d.). *Ground motion after seismic event: Scattering off a small mountain*. Retrieved July 8, 2021, from <https://www.comsol.com/model/ground-motion-after-seismic-event-scattering-off-a-small-mountain-78241>
- COMSOL Multiphysics. (n.d.). *Isotropic-anisotropic sample: Elastic wave propagation*. Retrieved July 8, 2021, from <https://www.comsol.com/model/isotropic-anisotropic-sample-elastic-wave-propagation-78231>
- 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>
- COMSOL Multiphysics. (n.d.). *Propagation of seismic waves through Earth*. Retrieved July 8, 2021, from <https://www.comsol.com/model/propagation-of-seismic-waves-through-earth-90381>

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>

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 нанoeлектроника», 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 нанoeлектроника», 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