



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 140–149  
*Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 140–149  
<https://mmi.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2025-25-1-140-149>, EDN: WVAEJQ

Научная статья  
УДК 519.673

## Математические модели для обработки и интерпретации сейсмических данных в новом методе сейсморазведки

А. А. Фонин , С. Г. Сучков, В. А. Николаевцев

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

**Фонин Анатолий Александрович**, ассистент кафедры геофизики, fonin.a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5049-4243>, SPIN: 5154-4289, AuthorID: 1039847

**Сучков Сергей Германович**, доктор физико-математических наук, руководитель научно-технологического центра «Микро- и наноэлектроника», suchkov.s.g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9159-3515>, SPIN: 5742-4500, AuthorID: 122657

**Николаевцев Виктор Андреевич**, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер научно-технологического центра «Микро- и наноэлектроника», nikolaevcev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1233-3983>, SPIN: 4078-1580, AuthorID: 723606

**Аннотация.** В настоящей работе для применения в новом методе сейсморазведки с вертикально расположенными сейсмоприемниками представлена полуаналитическая математическая модель, описывающая распространение акустического импульса по вертикали в слоистой среде с наклонными границами раздела сред, учитывающая основные параметры горных пород, такие как толщина слоев, плотность, скорость распространения акустических волн в породах, а также добротность этих сред и углы наклона границ. Проводится сравнение теоретической сейсмограммы по полуаналитической модели с результатами точного моделирования в программном комплексе Comsol Multiphysics. Построен алгоритм фильтрации сигналов в экспериментальных сейсмограммах для выделения сигналов, приходящих по вертикали. Для определения акустических и геологических параметров горных пород в автоматическом режиме (без участия геолога-интерпретатора) построен метод наименьших квадратов для поиска глобального минимума целевой функции, проверенный сравнением рассчитанных параметров с данными конкретного геологического разреза.

**Ключевые слова:** численное моделирование акустических полей, Comsol, Matlab, цифровая фильтрация сейсмограмм, интерпретация сейсмических данных

**Для цитирования:** Фонин А. А., Сучков С. Г., Николаевцев В. А. Математические модели для обработки и интерпретации сейсмических данных в новом методе сейсморазведки // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 140–149. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2025-25-1-140-149>, EDN: WVAEJQ

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

## Mathematical models for processing and interpreting seismic data in a new seismic survey method

А. А. Fonin , S. G. Suchkov, V. A. Nikolayevtsev

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Anatoly A. Fonin, fonin.a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5049-4243>, SPIN: 5154-4289, AuthorID: 1039847



**Sergey G. Suchkov**, suchkov.s.g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9159-3515>, SPIN: 5742-4500, AuthorID: 122657

**Victor A. Nikolayevtsev**, nikolaevcev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1233-3983>, SPIN: 4078-1580, AuthorID: 723606

**Abstract.** In the present work, a semi-analytical mathematical model is presented for application in a new seismic survey method with vertically positioned seismic receivers. This model describes the propagation of an acoustic impulse vertically in a layered structure with inclined boundaries of layers, with consideration of the main parameters of rock formations such as layer thicknesses, densities, velocities of acoustic wave propagation in rocks, the quality factors of these layers and the angles of boundary inclination. A comparison is made between the theoretical seismogram based on the semi-analytical model and the results of exact modeling in the Comsol Multiphysics software package. An algorithm for signal filtering in experimental seismograms is developed to extract signals coming vertically. A method of least squares is produced for determining acoustic and geological parameters of rock formations automatically (without the participation of a geologist-interpreter) to search for the global minimum of the objective function, validated by comparing the calculated parameters with data from a specific geological section.

**Keywords:** numerical modeling of acoustic fields, Comsol, Matlab, digital filtering of seismograms, interpretation of seismic data

**For citation:** Fonin A. A., Suchkov S. G., Nikolayevtsev V. A. Mathematical models for processing and interpreting seismic data in a new seismic survey method. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 140–149 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2025-25-1-140-149>, EDN: WVAEJQ

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Большинство современных геофизических методов исследования пород включает обработку значительного количества информации, анализ которого невозможно представить без применения численных алгоритмов и программных комплексов. В данной статье описано усовершенствование полуаналитической математической модели нового авторского метода сейсморазведки [1] и апробация этой модели сравнением с точным расчетом в программном комплексе Comsol Multiphysics, а также сравнением рассчитанных с использованием этой модели параметров пород геологического разреза с реальными.

Задачей нового метода сейсморазведки является определение таких характеристик слоев геологического разреза, как плотность пород, скорость и затухание звука в слоях, глубина залегания и наклон поверхностей раздела слоев. При этом интерпретация сейсмологических данных не требует непосредственного участия геолога-интерпретатора.

В работах [1–3] подробно изложены суть нового метода (вертикальное расположение приемников сейсмических волн), алгоритм цифровой фильтрации сейсмограмм, описание полуаналитической математической модели геологического разреза с горизонтальными границами раздела пород и результаты сравнения расчетных и измеренных параметров геологических сред.

Однако в природе слои в геологическом разрезе часто имеют наклон границ. Это увеличивает число определяемых параметров геологической структуры и усложняет процесс расчета вследствие учета рассеяния отраженных импульсов. Поэтому при работе с геофизическими данными необходимо учитывать геометрию границ раздела пород.

При цифровой фильтрации реальных сейсмограмм выделяются только сейсмосигналы, распространяющиеся по вертикали [1], заданной приемниками, так как при малых углах наклона слоев отличие времени приема сигналов также мало и уменьшается для более глубоких слоев. Поэтому при анализе будем учитывать только продольные волны, воспринимаемые приемниками, согласно схеме на рис. 1, а, б.

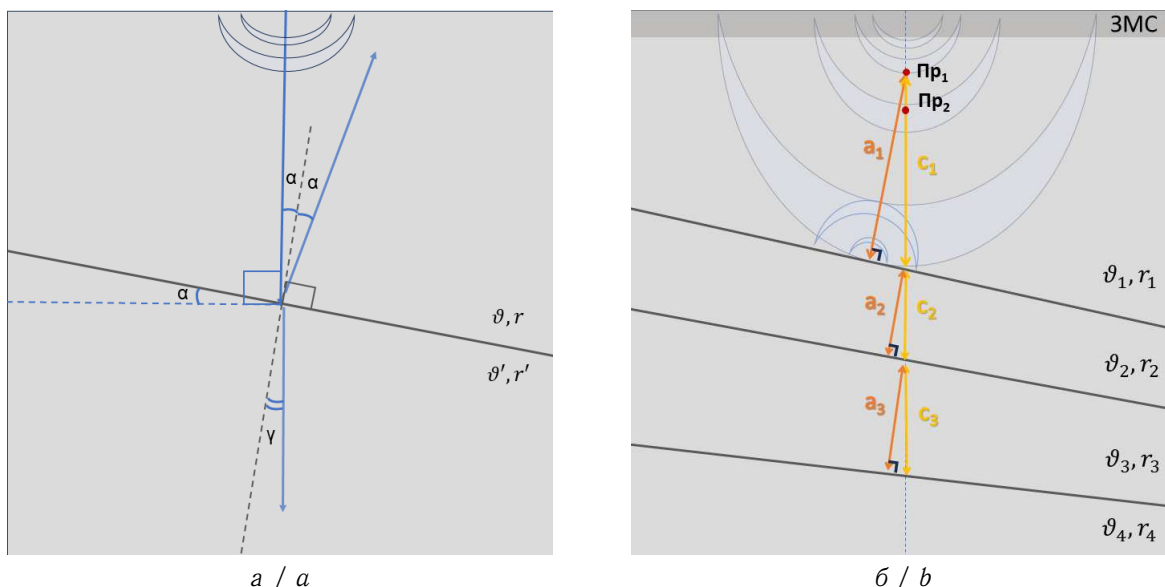


Рис. 1. Схема распространения акустической волны: а — через границу двух сред; б — в геологической структуре с наклонными границами слоев, где  $\alpha$  — угол наклона границы и угол падения волны,  $\gamma$  — угол преломления, Пр1 и Пр2 — приемники акустического сигнала,  $c_1$  — расстояние от приемника до границы по вертикали,  $c_2, c_3$  — толщины соответствующих слоев на вертикали под приемниками,  $a_1$  — кратчайшее расстояние от приемника до границы,  $a_2, a_3$  — кратчайшие расстояния между границами под датчиком,  $r_n$  — плотности соответствующего слоя,  $\vartheta_n$  — скорость продольной акустической волны в соответствующем слое, ЗМС (зона малых скоростей) верхний слой земли

Fig. 1. The diagram of acoustic wave propagation: а — across the boundary of two geological environments; б — in a geological structure with inclined layer boundaries, where  $\alpha$  is the angle of inclination of the boundary and the dip angle of the wave,  $\gamma$  is the angle of refraction, Пр1 and Пр2 are acoustic signal receivers,  $c_1$  is vertical distance from the receiver to the boundary,  $c_2, c_3$  — thickness of the corresponding layers on the vertical under the receivers,  $a_1$  — shortest distance from the receiver to the boundary,  $a_2, a_3$  — shortest distances between the boundaries under the sensor,  $r_n$  — densities of the corresponding layer,  $\vartheta_n$  — velocity of primary wave in the corresponding layer, LVZ (low velocity zone) upper layer of the earth

### 1. Полуаналитическая модель сейсмограммы геологического разреза

Рассмотрим принципы построения полуаналитической теоретической сейсмограммы для случая распространения по вертикали продольных волн в геологической структуре с наклоном границ слоев. При анализе волн на границах сред используется понятие *нормального акустического импеданса* [4]. Нормальные акустические импедансы для падающей ( $Z_p$ ), отраженной ( $Z_o$ ) и прошедшей ( $Z'$ ) волны равны

$$Z = Z_p = Z_o = \frac{r\vartheta}{\cos \alpha}, \quad Z' = \frac{r'\vartheta'}{\cos \gamma},$$

где  $r, r'$  — плотности в первом и во втором слое соответственно,  $\vartheta$  и  $\vartheta'$  — скорости продольной акустической волны в первом и во втором слое соответственно,  $\alpha$  — угол падения,  $\gamma$  — угол преломления. Тогда коэффициент отражения ( $V$ ) по амплитуде от границы при наклонном падении акустической волны

$$V = \frac{Z' - Z}{Z' + Z} = \frac{r'\vartheta' / \cos \gamma - r\vartheta / \cos \alpha}{r'\vartheta' / \cos \gamma + r\vartheta / \cos \alpha}. \tag{1}$$

Аналогично получаем выражение для коэффициента прохождения ( $W$ ) по амплитуде:

$$W = \frac{2Z'}{Z' + Z} = \frac{2r'\vartheta' / \cos \gamma}{r'\vartheta' / \cos \gamma + r\vartheta / \cos \alpha}, \tag{2}$$



$$\cos \gamma = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma} = \sqrt{1 - \left( \frac{\sin \alpha \vartheta'}{\vartheta} \right)^2}. \quad (3)$$

Однако изменения в математических выкладках при учете наклона границ не ограничиваются учетом угла наклона в формулах коэффициентов отражения и преломления. Необходимо ввести поправку на пройденное волной расстояние в каждом слое, так как оно отличается от толщины слоя по вертикали (параметр  $c$  на рис. 1, б). На рис. 1, б видно, что сферическая акустическая волна в первую очередь достигнет наклонной границы в точке, удаленной от вертикали, находящейся на расстоянии  $a$  от приемника.

Целью модификации построенного ранее метода [2, 3] является расчет толщины слоев строго по вертикали (см. рис. 1, б) под датчиками, т. е.

$$c_n = \frac{a_n}{\cos \alpha_n}.$$

Таким образом в модели с наклонными границами для расчета теоретической сейсмограммы используются формулы для расчета коэффициентов отражения и прохождения (1) и (2), а также расстояния по вертикали между границами  $c_n$ . Для геологической структуры со многими слоями теоретическая модель, описывающая акустические процессы в трех слоях, применяется последовательно для более глубоких слоев, когда падающее акустическое поле принимается как поле акустической волны продольного типа, прошедшей выше расположенные слои.

Для проверки модифицированной полуаналитической теоретической модели геологической структуры с наклонными границами слоев аналогично [2, 3] была построена модель для точного вычисления «экспериментальной» сейсмограммы в программном комплексе Comsol Multiphysics. Был выбран физический интерфейс Elastic Waves, Time Explicit для моделирования распространения упругих волн в линейных упругих средах методом конечных элементов (МКЭ)<sup>1</sup>. Интерфейс Elastic Waves, Time Explicit вычисляет скорость колебаний и деформацию в узлах сетки МКЭ. Основной задачей моделирования распространения акустического сигнала является вычисление смещений в точках приема (Пр1, Пр2) в различные моменты времени (сейсмограмма).

Параметр, который описывает затухание акустической волны в среде, называется «добротность» ( $Q$ -factor) [4]. В выбранном интерфейсе затухание может быть введено с использованием модели демпфирования Рэлея<sup>2</sup> и заданием относительного коэффициента демпфирования  $\zeta$  в ней.

$$\zeta \approx \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{A(t)}{A(t+T)} \right),$$

где  $A(t)$  и  $A(t+T)$  — амплитуды в моменты времени, отличающиеся на период. Добротность  $Q$  связана с относительным коэффициентом демпфирования  $\zeta$  следующим образом:

$$Q = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \approx \frac{1}{2\zeta}.$$

В моделируемой геологической структуре для каждого слоя указывались такие физические параметры, как плотность, скорости продольной и поперечной волн и добротность. Параметры модели, соответствующие геологическому разрезу [5], представлены в табл. 1.

<sup>1</sup>Isotropic-Anisotropic Sample: Elastic Wave Propagation. Application Gallery. URL: <https://www.comsol.com/model/isotropic-anisotropic-sample-elastic-wave-propagation-78231> (дата обращения: 10.05.2020); Ground Motion After Seismic Event: Scattering off a Small Mountain. Application Gallery. URL: <https://www.comsol.com/model/ground-motion-after-seismic-event-scattering-off-a-small-mountain-78241> (дата обращения: 10.05.2020); Propagation of Seismic Waves Through Earth. Application Gallery. URL: <https://www.comsol.com/model/propagation-of-seismic-waves-through-earth-9038> (дата обращения: 10.05.2020).

<sup>2</sup>Теория и механизмы демпфирования в механике конструкций. Блог COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru/blogs/damping-in-structural-dynamics-theory-and-sources/> (дата обращения: 14.05.2020); Акустика. COMSOL Multiphysics. URL: <https://www.comsol.ru/acoustics-module> (дата обращения: 29.04.2020).

Параметры модели с наклонными границами  
Model parameters with sloping boundaries

Толщина слоя, м	Скорость продольной волны, м/с	Скорость поперечной волны, м/с	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Добротность	Угол наклона границы, °
15	1800	1058.8	1500	50	0.0
225	2200	1294.1	2150	100	5.7
205	4670	2747.1	2500	150	11.3
150	2950	1735.3	2400	170	13.5
105	6000	3529.4	2600	80	17.7

Параметр «толщина слоя», представленный в табл. 1, является расстоянием между границами строго по вертикали под датчиками (параметры  $c$  на рис. 1, б). Геометрия модели с наклонными границами и расположением приемников приведена на рис. 2.

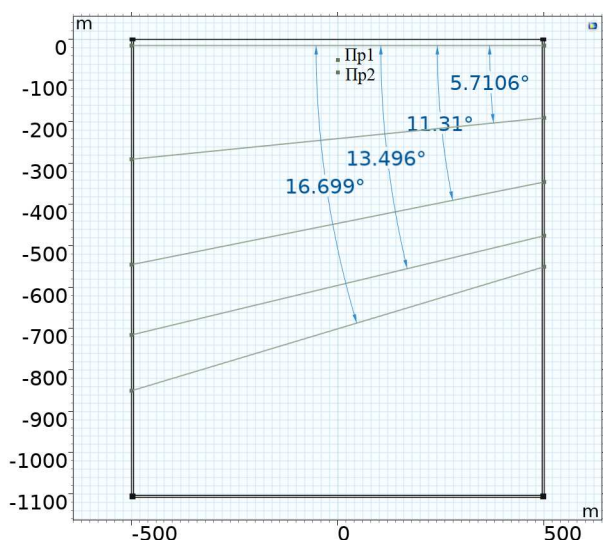


Рис. 2. Геометрия модели с указанными углами наклона границ. Точками указаны приемники акустического сигнала Пр1 на глубине 50 м и Пр2 на глубине 80 м

Fig. 2. Geometry of the model with specified boundary inclination angles. The receivers of the acoustic signal Пр1 at a depth of 50 m and Пр2 at a depth of 80 m are indicated by points

Одним из важнейших этапов численного моделирования является разбиение рассматриваемой области на конечные элементы. Разбиение на конечные элементы производилось в автоматическом режиме с добавлением узла Маррэд, который используется, чтобы создать структурированную четырехугольную сетку.

## 2. Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены результаты моделирования в программном комплексе Comsol Multiphysics распространения акустической (сейсмической) волны при взрывном возбуждении в различные моменты времени в модели с наклонными границами.

На рис. 3 для разных моментов времени представлены картины распространяющихся волн в виде вертикальных колебательных скоростей частиц породы, причем густота цвета харак-

В модели глубина зоны малых скоростей (ЗМС) составляет 15 м. Для устранения отражений от границ рассматриваемой области боковые и нижняя границы моделировались в виде сильно поглощающих слоев.

Верхняя граница полупространства является свободной, а в начале системы координат расположен точечный источник акустических волн. Входной импульс, возбуждаемый этим источником, задается в виде силы  $F_{in}$ :

$$F_{in}(t) = F_0 \frac{1 - e^{-\frac{9t}{T_{imp}}}}{1 + e^{-9\left(\frac{t}{T_{imp}} - 1\right)}} \sin(2\pi f_{imp}t),$$

где  $t$  — время,  $T_{imp}$  — длительность входного импульса,  $f_{imp}$  — центральная частота источника. Это выражение получено на основе аппроксимации формы первого импульса в экспериментальных сейсмограммах.

Для численного эксперимента были выбраны следующие параметры входного импульса:  $F_0 = 500$  кН,  $T_{imp} = 0.01$  с,  $f_{imp} = 100$  Гц.



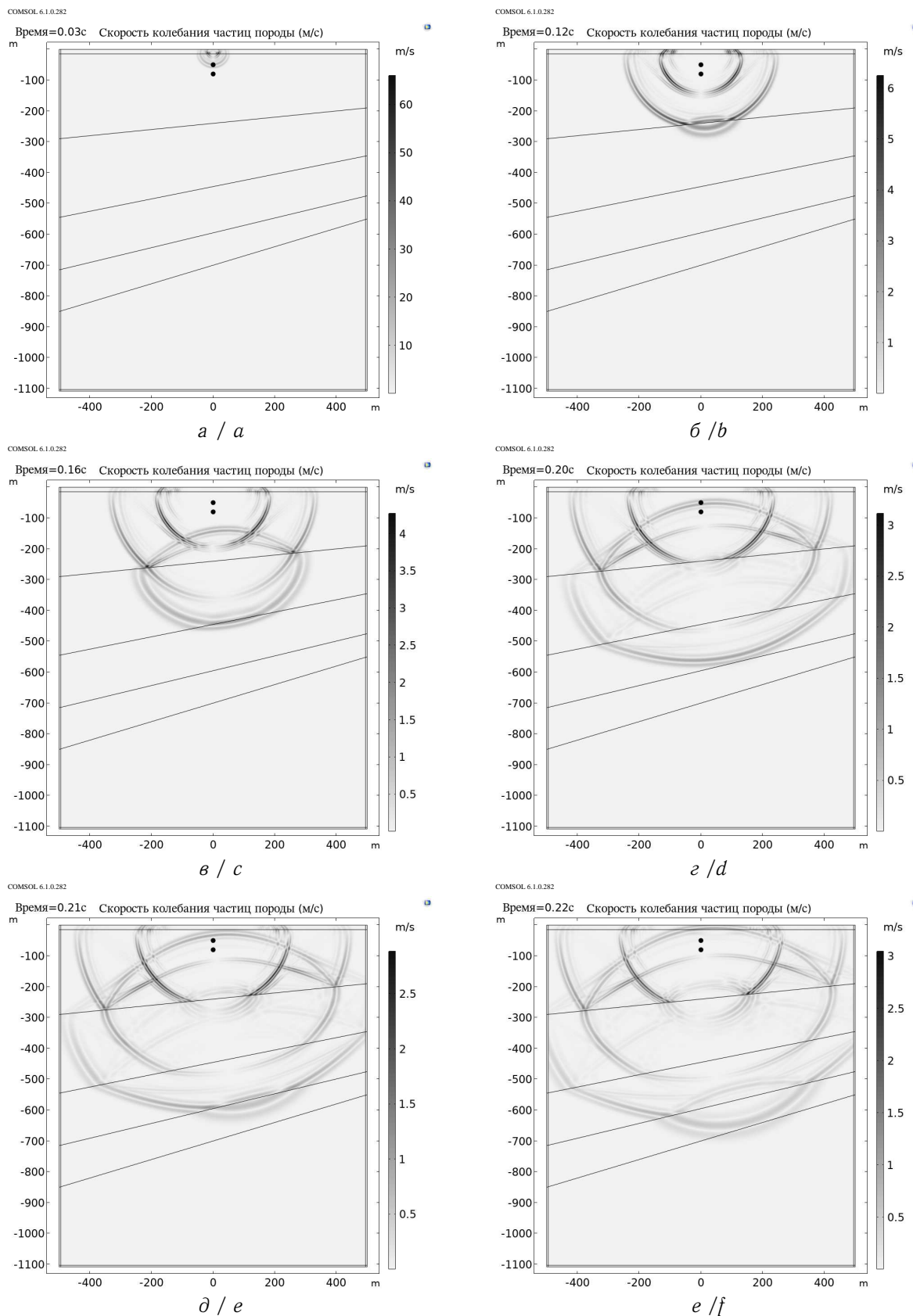


Рис. 3. Распространение акустических волн от точечного источника на поверхности в зоне малых скоростей и первых трех слоях геологической структуры в моменты времени 0.03 с (а), 0.12 с (б), 0.16 с (в), 0.20 с (г), 0.21 с (д), 0.22 с (е)

Fig. 3. Propagation of acoustic waves from a point source on the surface in the zone of low velocities and the first three layers of the geological structure at time 0.03 sec (a), 0.12 sec (b), 0.16 sec (c), 0.20 sec (d), 0.21 sec (e), 0.22 sec (f)



теризует амплитуду. В первые моменты времени видны две ярко выраженные волны, первая, распространяющаяся с большей скоростью, является продольной волной, а вторая — поперечной. Характерно, что на фронте поперечных волн в центре (вблизи вертикали) амплитуда мала, так как возбуждающая сила направлена по вертикали.

Модельные сейсмоимпульсы продольных волн, принятые в двух точках расположения приемников на глубине 50 и 80 м, были введены в программу цифровой фильтрации (на MatLab), произведена их обработка, результаты которой представлены на рис. 4.

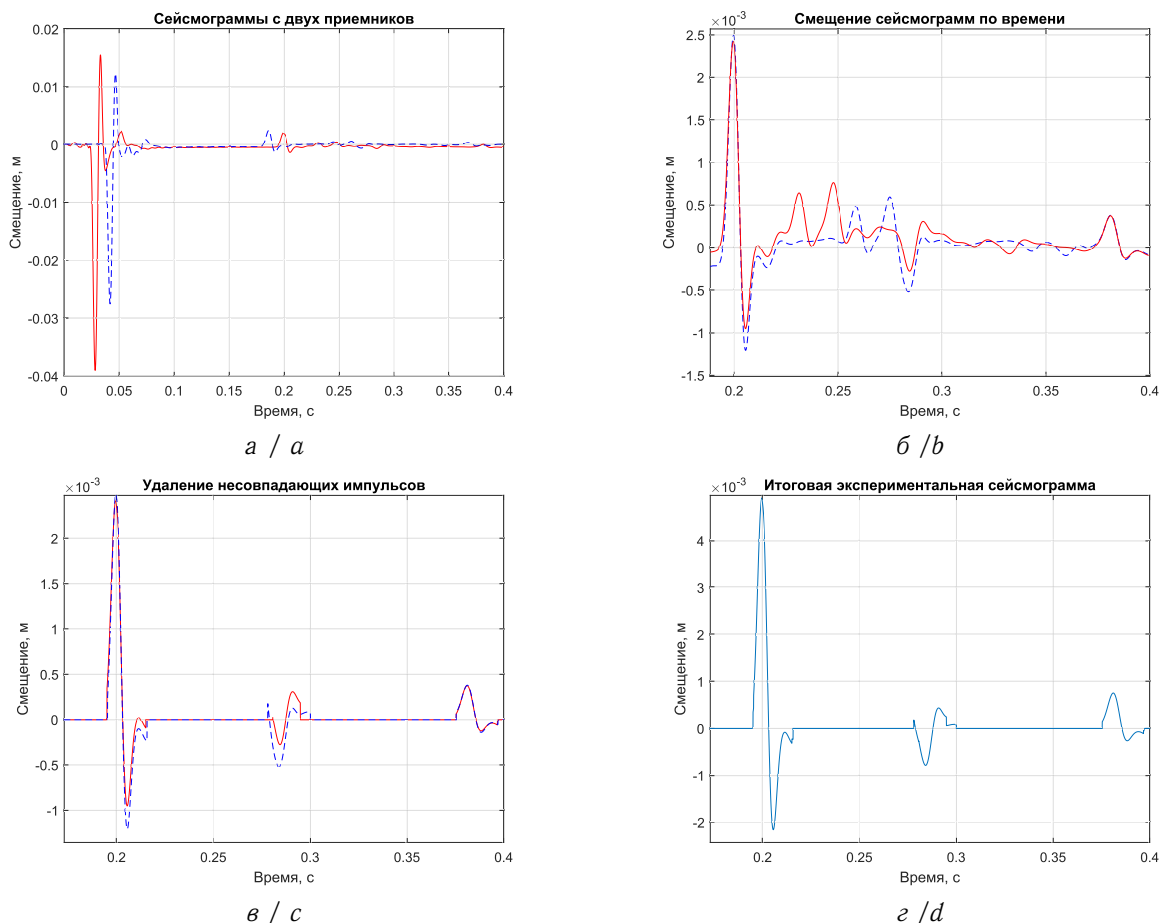


Рис. 4. Результат обработки «экспериментальных» сейсмограмм для структуры с наклонными границами. Штриховой линией обозначены сейсмограммы с нижнего приемника, сплошной линией — с верхнего приемника: *a* — исходные сейсмограммы; *b* — смещение по времени сейсмограммы нижнего приемника к сейсмограмме верхнего; *c* — исключение несовпадающих импульсов; *d* — итоговая сейсмограмма

Fig. 4. Processing results of experimental seismograms for a structure with sloping boundaries. Seismograms from the lower receiver are shown with dashed lines, while seismograms from the upper receiver are shown with solid lines: *a* — original seismograms; *b* — time shifting of the lower receiver seismogram to match the upper receiver seismogram; *c* — exclusion of non-matching impulses; *d* — final seismogram

Алгоритм цифровой фильтрации применяется для «очистки» экспериментальных сейсмограмм от посторонних сигналов и заключается в сравнении двух сейсмограмм, полученных с двух приемников, расположенных на одной вертикали друг под другом на некотором известном расстоянии. По разнице времени входных импульсов на этих сейсмограммах определяется время задержки сигнала, распространяющегося вертикально между датчиками. Затем производится смещение одной сейсмограммы на рассчитанное время задержки, что



позволяет получить две сейсмограммы, у которых импульсы, отраженные от границ под датчиками, совпадают, в то время как импульсы, отраженные от границ, удаленных от вертикали расположения приемников, будут смещены по времени относительно друг друга.

В результате обработки получается амплитудно-временная зависимость, полученная путем удаления несовпадающих сигналов и сложения сейсмограмм с двух приемников.

Для оценки адекватности введенных изменений для наклонных границ была рассчитана по полуаналитической модели теоретическая сейсмограмма, входные параметры которой соответствуют параметрам модели в Comsol.

Сравнение «экспериментальной» (построенной в Comsol) и теоретической сейсмограмм для модели с наклонными границами, свойства которой приведены в табл. 2, показано на рис. 5.

Таблица 2 / Table 2

Диапазоны значений варьируемых параметров, шаг цикла и найденные значения для первого слоя  
 Ranges of variable parameters, loop step, and found values for the first layer

Параметр	Диапазон значений	Шаг	Истинные значения	Найденные значения
Толщина, м	210–240	1	225	225
Скорость волны, м/с	2050–2350	1	2200	2199
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1900–2400	10	2150	2120
Добротность	70–130	2	100	100
Угол наклона, °	0–7	0.2	5.71	6

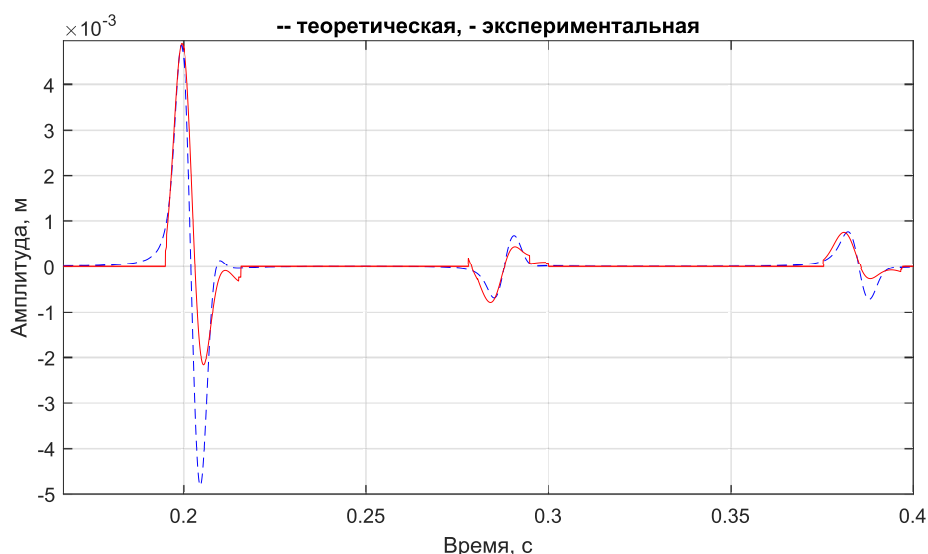


Рис. 5. «Экспериментальная» (сплошная) и теоретическая (штриховые) сейсмограммы, рассчитанные для модели с наклонными границами для первых трех границ, расположенных ниже приемников

Fig. 5. Experimental (solid) and theoretical (dashed) seismograms calculated for a model with inclined boundaries for the first three layers located below the receivers

Из рис. 5 видно, что при равенстве всех параметров модели время прихода и амплитуда импульсов «экспериментальной» и теоретической сейсмограмм совпадают, т. е. построенная модель является адекватной. Следовательно, разработанный математический аппарат может быть успешно применен для интерпретации сейсмических данных.

Основная цель нового метода сейсморазведки с двумя вертикальными приемниками заключается в расчете параметров, описывающих механические свойства пород геологического





разреза. Для этого на основе теоретической сейсмограммы  $S_{th}(t)$  и экспериментальной сейсмограммы  $S(t)$  строится целевая функция в виде суммы квадратов разностей расчетных и измеренных значений амплитуд сигналов [6, 7].

$$F(a_1, a_2, \dots, a_N) = \sum_{i=1}^P (S_{th}(t_i) - S(t_i))^2, \quad (4)$$

где моменты времени  $t_i$  соответствуют максимумам экспериментальной сейсмограммы,  $i = 1, 2, \dots, p$ .

Глобальный минимум этой функции достигается при таком наборе значений указанных параметров, при которых расчетная сейсмограмма наиболее близка к экспериментальной. Следовательно, можно утверждать, что полученные в результате минимизации параметры соответствуют реальной геологической структуре.

Алгоритм поиска параметров многих слоев геологической структуры методом наименьших квадратов заключается в следующем: на первом этапе расчеты проводятся для первых двух-трех границ и определяются все акустические параметры, глубины границ раздела и толщин этих слоев; на втором этапе, исходя из формы и спектра акустического импульса, прошедшего эти слои, задача решается повторно для следующих двух-трех слоев в глубину.

Программа минимизации целевой функции (4) была написана в системе MatLab. В процессе поиска глобального минимума и получения достоверных значений параметров, соответствующих реальной геологической структуре, была выявлена необходимость отслеживания не одного, а как минимум трех импульсов для получения близких значений найденных параметров.

В результате работы программы получен набор параметров, отличающийся от истинных значений для пород рассматриваемого геологического разреза (см. табл. 1 и 2) менее чем на 1.5% и на 5% для значения угла наклона границы.

Таким образом, каждый из найденных наборов параметров геологического разреза с высокой точностью согласуется со значениями экспериментальной модели, и среди них отсутствуют значения параметров, далекие от истинных.

## Заключение

В настоящей работе представлена полуаналитическая математическая модель, описывающая распространение акустической волны в слоистой среде с наклонными границами раздела сред. Согласно результатам настоящего исследования можно сделать вывод, что разработанная полуаналитическая модель позволяет построить теоретическую сейсмограмму, которая сходится в процессе поиска глобального минимума к очищенной от неинформативных импульсов экспериментальной сейсмограмме, полученной для реального разреза горных пород, что позволяет применить полуаналитическую модель для расчета параметров слоев геологического разреза, таких как толщина слоев, их плотность, скорость распространения акустических волн в них, а также добротность этих сред и углы наклона границ. Построенный алгоритм обеспечивает определение параметров геологического разреза в автоматическом режиме без участия геолога-интерпретатора.

Таким образом, разработанный алгоритм представляет собой эффективный инструмент для автоматизированного анализа геологических данных и определения параметров горных пород.

## Список литературы

1. Фонин А. А., Сучков С. Г., Михеев С. И., Николаевцев В. А., Сучков Д. С. 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. Москва : ИО РАН, 2020. С. 286–293. <https://doi.org/10.29006/978-5-9901449-5-8-46>, EDN: XFCZKQ



2. Фонин А. А., Сучков С. Г., Николаевцев В. А., Михеев С. И. Математическое моделирование нового метода обработки сейсмосигнала на примере разреза Саратовского Правобережья. Часть 1 // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2023. Т. 9, № 1 (33). С. 92–106. <https://doi:10.21684/2411-7978-2023-9-1-92-106>, EDN: LBNLCP
3. Фонин А. А., Сучков С. Г., Николаевцев В. А., Михеев С. И. Математическое моделирование нового метода обработки сейсмосигнала на примере разреза Саратовского Правобережья. Часть 2 // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2023. Т. 9, № 2 (34). С. 139–152. <https://doi:10.21684/2411-7978-2023-9-2-139-152>, EDN: YNXBLY
4. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. Москва : Наука, 1973. 343 с.
5. Конценебин Ю. П., Рыскин М. И., Балабанов В. Г., Михеев С. И., Коробова Л. А. Геофизическое моделирование ловушек нефти и газа. (Труды научно-исследовательского института геологии Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского). Саратов : Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1999. 142 с.
6. Симончик К. К., Тропченко А. Ю., Хитров М. В. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие. С. Петербург : СПбГУ ИТМО, 2012. 108 с.
7. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. Москва : Физматгиз, 1958. 334 с.

### References

1. Fonin A. A., Suchkov S. G., Mikheyev S. I., Nikolayevtsev V. A., Suchkov D. S. New method of geological profile acoustic parameters determination. *Akustika okeana* [Ocean Acoustics]. Reports of the XVII School-Seminar named after. acad. L. M. Brekhovskikh, combined with the XXXIII session of the Russian Acoustical Society. Moscow, IO RAS, 2020, pp. 286–293 (in Russian). <https://doi:10.29006/978-5-9901449-5-8-46>, EDN: XFCZKQ
2. Fonin A. A., Suchkov S. G., Nikolayevtsev V. A., Mikheyev S. I. 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*, 2023, vol. 9, iss. 1 (33), pp. 92–106 (in Russian). <https://doi:10.21684/2411-7978-2023-9-1-92-106>, EDN: LBNLCP
3. Fonin A. A., Suchkov S. G., Nikolayevtsev V. A., Mikheyev S. I. 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*, 2023, vol. 9, iss. 2 (34), pp. 139–152 (in Russian). <https://doi:10.21684/2411-7978-2023-9-2-139-152>, EDN: YNXBLY
4. Brekhovskikh L. M. *Volny v sloistykh sredakh* [Waves in layered structures]. Moscow, Nauka, 1973. 343 p. (in Russian).
5. Kotsenebin Yu. P., Ryskin M. I., Balabanov V. G., Mikheyev S. I., Korobova L. A. *Geofizicheskoe modelirovaniye lovushek nefti i gaza* [Geophysical modeling of oil and gas traps]. Proceedings of the Research Institute of Geology Saratov State University named after N. G. Chernyshevsky. Saratov, Kolledzh, 1999. 142 p. (in Russian).
6. Simonchik K. K., Tropchenko A. Yu., Khitrov M. V. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]: Tutorial. St. Petersburg, St. Petersburg State University ITMO Publ., 2012. 108 p. (in Russian).
7. Linnik Yu. V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniya* [The least squares method and the fundamentals of the mathematical and statistical theory of observation processing]. Moscow, Fizmatgiz, 1958. 334 p. (in Russian).

Поступила в редакцию / Received 06.03.2024

Принята к публикации / Accepted 20.06.2024

Опубликована / Published 28.02.2025