Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Пашкин Александр Игоревич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ГЕОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ШИРОКОПОЛОСНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ABCD-МАТРИЦ

2.8.3 Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор, профессор кафедры ФизГео
Черепецкая Елена Борисовна

Москва, 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из важнейших задач при разработке и совершенствовании методов исследования структуры и физико-механических свойств образцов горных пород является повышение их информативности. При этом структурные особенности геоматериала на сегодняшний день изучают такими методами, как акустическая микроскопия, рентгеновская томография, ультразвуковая структуроскопия и др. Наиболее информативными при диагностике структуры и свойств таких сложных гетерогенных материалов, как горные породы, являются рентгеновская томография и акустические методы. При этом методы рентгеновской томографии, работающие в режиме просвечивания образца, требуют более сложной и кропотливой работы, а акустические методы представлены только в режиме отраженных волн.

Известно, что режим просвечивания обладает большей максимальной глубиной зондирования, чем режим отраженных волн, поэтому разработка акустического метода исследования структуры геоматериалов, работающего в режиме «на просвет», в настоящее время необходима для нужд геоконтроля. Также следует отметить, что до недавнего времени в акустических исследованиях не учитывалось влияние эффектов дифракции и частотнозависимого затухания даже при определении скоростей акустических волн, что заметно увеличивало погрешность акустических методов структуроскопии. Корректный учет данных параметров требует использования широкополосных сигналов и применения алгоритмов цифровой обработки экспериментальных данных, в большинстве случаев базирующихся на методе конечных элементов (МКЭ) и использующих огромные вычислительные мощности.

На сегодняшний день наиболее просто реализовывать эффективное возбуждение широкополосных акустических сигналов с помощью лазерной генерации ультразвука, а осуществлять прием этих сигналов возможно с использованием тонкопленочных пьезопреобразователей. В связи с этим решение задач теоретического и методического характера, направленных на повышение эффективности и совершенствование широкополосных лазерно-ультразвуковых измерений за счет использования специальных алгоритмов обработки зондирующих акустических сигналов как в режиме отраженных, так и в режиме проходящих волн, ускорения процесса моделирования, а также обоснования и разработки на этой основе соответствующего метода

исследования структурных особенностей горных пород и методики его применения, является актуальной научной задачей.

Настоящая работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (проект №20-35-90044).

Целью работы является разработка метода исследования структуры геоматериалов на основе широкополосной ультразвуковой спектроскопии с применением специально разработанного алгоритма обработки сигналов, учитывающего рассеянные, отраженные от неоднородностей и прошедшие через исследуемую среду импульсы.

Основная идея работы состоит в реконструкции внутренней структуры образца путем расшифровки широкополосного акустического сигнала, прошедшего через исследуемый геоматериал, с использованием ABCD-матриц.

Основные научные положения, **выносимые на защиту**:

1. Разработана теоретическая модель, описывающая процесс распространения широкополосных акустических сигналов с гауссовым распределением давления в поперечном сечении в слоистой среде с учетом частотных зависимостей затухания, фазовой скорости и эффектов дифракции на основе метода ABCD-матриц.
2. На основе разработанной теоретической модели создан алгоритм определения физико-механических свойств элементов слоистой среды по информативным параметрам прошедших через геоматериал широкополосных ультразвуковых сигналов.
3. Разработан метод изучения внутренней структуры геоматериала по изменениям в акустическом сигнале, прошедшем через исследуемый объект, с учетом частотных зависимостей затухания, фазовой скорости и эффектов дифракции.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- использованием верифицированных методов оптоакустики и статистического анализа;
- удовлетворительной сходимостью полученных результатов реконструкции внутренней структуры образцов с результатами исследований других авторов и экспериментальными данными;
- положительными результатами апробации и верификации разработанного метода и программного обеспечения.

Методы исследования включают: анализ и обобщение научно-технической информации; математическое и компьютерное моделирование процесса распространения широкополосных импульсов продольных волн, сравнительный и статистический анализ результатов измерений.

Научная новизна работы заключается в**:**

- установлении закономерностей изменения под влиянием структурных неоднородностей информативных параметров широкополосных ультразвуковых сигналов, распространяющихся в слоистой среде, в режимах проходящих и отраженных волн;
- создании алгоритма получения информации о внутренней структуре геоматериалов на основе метода ABCD матриц с использованием программных средств обработки модельных и экспериментальных сигналов;
- использовании изменений в акустическом сигнале, прошедшем через исследуемый объект, с учетом частотных зависимостей затухания, фазовой скорости и эффектов дифракции для исследования структуры геоматералов.

Практическая значимость работы заключается в:

- разработке программы, реализующей разработанный алгоритм определения физико-механических свойств элементов слоистой среды по информативным параметрам прошедших через геоматериал широкополосных ультразвуковых сигналов, зарегистрированной в Реестре программ для ЭВМ (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU №2020610531 от 15.01.2020);
- создании методики исследования структуры геоматериалов на основе широкополосной ультразвуковой спектроскопии с использованием ABCD-матриц, позволяющей повысить достоверность структуроскопических исследований при лабораторном изучении образцов горных пород.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертационной работы были доложены на международной конференции «XX Conference of PhD Students and Young Scientists» (Польша, 14 – 16 октября 2020 г.); на XXIX международных научных симпозиумах «Неделя Горняка – 2021» (Россия, г. Москва, 26-29 января 2021 г.) и «Неделя Горняка – 2022» (Россия, г. Москва, 1-4 февраля 2022 г.)

По теме диссертации опубликовано 4 научные работы, входящие в базу данных Scopus, в том числе из них 3 – в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 91 источника и 1 приложения, содержит 63 рисунка и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** анализируется современное состояние проблемы определения внутренней структуры геоматериала методами неразрушающего контроля и актуальность применения ультразвуковых методов, использующих широкополосные сигналы, с целью решения указанной проблемы. Показано, что несмотря на известные достоинства ультразвуковых методов, на сегодняшний день ни один из них не предоставляет возможности определения внутренней структуры и физико-механических свойств исследуемого объекта по изменению характеристик зондирующего сигнала. В частности, с изменениями характеристик сигнала сопоставляются только средние на весь образец свойства, тогда как геоматериалы представляют собой структуры высокой неоднородности и могут включать в себя множество дискретных по свойствам и расположению элементов. Показано, что потенциально перспективным направлением совершенствования ультразвуковых методов, использующих широкополосные сигналы, является применение алгоритмов обработки сигналов, позволяющих конкретизировать зависимость изменений формы и спектра зондирующего сигнала от внутренней структуры исследуемого геоматериала в режиме проходящих волн, а также применение методов моделирования, требующих меньших вычислительных мощностей, чем методы, основанные на методе конечных элементов. На основе анализа материалов первой главы были сформулированы приведённая выше цель и следующие задачи диссертационного исследования:

1. Создать теоретическую модель, описывающую процесс распространения широкополосных ультразвуковых импульсов с гауссовым распределением давления в поперечном сечении в слоистой среде на основе метода ABCD-матриц.
2. Разработать на основе полученной теоретической модели алгоритм обработки широкополосных ультразвуковых сигналов, прошедших через гетерогенную среду, а также рассеянных и отраженных от ее неоднородностей.
3. Создать программу, реализующую разработанный алгоритм обработки сигналов.

4. Разработать метод исследования структуры геоматериалов на основе созданного алгоритма.
5. Провести серию модельных экспериментов с помощью разработанного метода на специально синтезированных образцах на установках «ГЕОСКАН-2М» и «УДЛ-2М», а также апробацию и верификацию этого метода.
6. Провести экспериментальные исследования физико-механических свойств и внутренней структуры горных пород на образцах с помощью разработанного метода исследования и установить его ограничения.

Во **второй главе** проводится обоснование возможности моделирования процесса распространения, рассеяния и отражения широкополосных ультразвуковых импульсов продольных волн в недиспергированном геоматериале методом ABCD матриц, разрабатывается теоретическая модель и представляется разработанный метод моделирования.

Для обоснования возможности моделирования вышеуказанного процесса была рассмотрена следующая задача. Будем считать, что оптико-акустический преобразователь состоит из прозрачной призмы и оптико-акустического генератора. Пусть из прозрачной среды призмы по нормали к границе ($z = 0$) с поглощающей средой генератора падает плоская световая волна с интенсивностью $I = I_0 f(t) H(\vec{r}_\perp)$, где I_0 – амплитудное значение интенсивности, а $f(t)$ и $H(\vec{r}_\perp)$ ($\vec{r}_\perp = \{x, y\}$), соответственно, временная огибающая и распределение по поперечному сечению интенсивности пучка. Без ограничения общности считаем, что временная огибающая $f(t)$ и её фурье-образ $\tilde{f}(\omega)$ имеют гауссову форму:

$$\begin{cases} f(t) = \pi^{-1/2} \exp[-(t/\tau_L)^2] \\ \tilde{f}(\omega) = \tau_L \exp[-\omega^2 \tau_L^2/4] \end{cases}, \quad (1)$$

где τ_L – характерная длительность лазерного импульса.

Для эффективного возбуждения ультразвуковой волны необходимо, чтобы в среде оптико-акустического генератора было реализовано сильное поглощение оптического излучения, то есть коэффициент поглощения света α должен иметь порядок (10^3- 10^4) см$^{-1}$. В этом случае ширина оптического пучка a значительно больше, чем глубина α^{-1} проникновения света в среду генератора, что дает возможность применить метод поэтапного подхода. На первом этапе предполагается, что пространственное распределение интенсивности лазерного излучения не влияет на процесс генерации, поперечными градиентами теплового поля можно пренебречь и возбуждается

только продольная волна. Тогда процесс генерации продольной волны с колебательной скоростью $\vec{v}$ частиц описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} c_L^{-2}\dfrac{\partial \vec{v}}{\partial t} - \Delta\vec{v} = -\beta\left(1 - 4\dfrac{c_T^2}{3c_L^2}\right)\dfrac{\partial^2 T}{\partial t \partial z} \\ \dfrac{\partial T}{\partial t} = \chi\Delta T + \dfrac{\alpha I_0}{\rho c_p} f(t) H(\vec{r}_\perp) e^{-\alpha z} \end{cases}, \tag{2}$$

где $z > 0$, χ – коэффициент температуропроводности, $\beta = V^{-1}(\partial V/\partial T)_p$ – температурный коэффициент объемного расширения, c_p - удельная теплоемкость среды генератора при постоянном давлении p, ρ – плотность среды генератора, c_L, c_T - скорости продольных и поперечных волн. Таким образом вне области нагрева $|z| > max\,(\alpha^{-1}, \sqrt{(\chi_{1,2}\,/\,\omega)})$ (индекс 1 при коэффициенте температуропроводности относится к материалу прозрачной призмы, 2 - для среды оптико-акустического генератора) существуют две бегущие продольные акустические волны. Одна из этих волн распространяется в призме и является опорной, вторая – в генераторе и является зондирующей. Каждая гармоника ω данных волн описывается выражением:

$$\widetilde{v_{1,2}} = K_{1,2}(\omega) I_0 \tilde{f}(\omega) \exp(i\omega(t \pm z/c_L)), \tag{3}$$

где индекс 1 и знак «-» соответствуют опорной волне, а индекс 2 и знак «+» - зондирующей. Передаточные функции $K_{1,2}(\omega)$ для каждой среды зависят от ее физико-механических и тепловых свойств и при условии, что длина диффузии тепла за время τ_0 лазерного воздействия $L_T = \sqrt{\chi\tau_0}$ значительно меньше, чем глубина его проникновения α^{-1}, определяются выражениями

$$\begin{aligned} K_1(\omega) &= \frac{\beta^*}{\rho_0 c_p}\frac{N}{N+1}\frac{1+\imath\omega/\omega_a}{1+(\omega/\omega_a)^2} \\ K_2(\omega) &= \frac{\beta^*}{\rho_0 c_p}\frac{1}{N+1}\frac{1-\imath N\omega/\omega_a}{1+(\omega/\omega_a)^2}, \end{aligned} \tag{4}$$

где $\omega_a = \alpha c_L$, $N = \rho_0 c_L/\rho_1 c_{L1}$, $\beta^* = \beta\left(1 - 4\frac{c_T^2}{3c_L^2}\right)$.

Если на первом этапе описывается процесс формирования плоских бегущих волн при лазерном возбуждении ультразвука, то на втором этапе описывается дифракционное искажение сформировавшихся акустических пучков и их распространение в слоистой среде. Предполагается, что поперечное распределение интенсивности оптического излучения имеет гауссову форму

$$H(\vec{r}_\perp) = \exp\left(-\frac{\vec{r}_\perp{}^2}{a^2}\right), \tag{5}$$

что соответствует основной моде генерации лазера. Тогда в однородной среде в параболическом приближении процесс дифракционного искажения гауссова пучка описывается выражением:

$$\tilde{v}(\omega, \vec{r}_\perp, z) = \frac{K(\omega) I_0 \tilde{f}(\omega)}{1+\imath z/L_{DF}} \exp\left[-\frac{r_\perp^2}{a^2(1+\imath z/L_{DF})}\right], \quad (6)$$

где $L_{DF} = \omega a^2/2c_0 = \pi a^2/\lambda$ – длина дифракции на частоте ω.

Для учета дифракции в многослойной среде выражение (6) можно упростить, используя ABCD матрицы. Рассмотрим систему из трех плоскопараллельных слоев толщиной L_1, L_2 и L_3, в которых скорости продольных волн c_1, c_2 и c_3, а плотности ρ_1, ρ_2 и ρ_3 соответственно. Считаем, что источник находится в слое 1 (генератор), а приемник – в слое 3. Тогда слой 2 – исследуемый объект. Также, в соответствии с приближением параксиальных пучков считаем, что угол отклонения вектора колебательной скорости от оси $\alpha \cong \sin(\alpha) \cong tan(\alpha)$. Вектор колебательной скорости $\vec{v}$ представим через радиальное смещение r и угол его отклонения от оси α. Тогда, в соответствии с законами Снеллиуса, смещение r_2 и угол отклонения волны α_2 в слое 2 сразу после прохождения границы раздела 1-2 описываются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} r_2 &= 1 \cdot r_0 + L_1 \cdot \alpha_0 \\ \alpha_2 &= 0 \cdot r_0 + \frac{c_2}{c_1} \cdot \alpha_0 \end{aligned}, \quad (7)$$

где r_0 и α_0 радиальное смещение и угол отклонения волны сразу после возбуждения в материале генератора, а в системе (7) учтены преобразования, возникшие как при прохождении слоя 1, так и при прохождении границы раздела 1-2.

Выражения (7) можно представить в матричном виде:

$$\begin{vmatrix} r_2 \\ \alpha_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & \frac{c_2}{c_1} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} r_0 \\ \alpha_0 \end{vmatrix}, \quad (8)$$

обозначив ABCD матрицу в рамках акустики следующим образом:

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & \frac{c_2}{c_1} \end{vmatrix}, \quad (9)$$

Также, если по аналогии с оптическим элементом назвать акустическим элементом часть среды, производящую определенное влияние на свойства волны, получим, что рассматриваемая среда состоит из пяти элементарных акустических элементов – слоя 1, границы раздела слоев 1-2, слоя 2, границы раздела слоев 2-3 и слоя 3. Таким образом, в соответствии со свойствами

ABCD-матриц, матрица для рассматриваемого акустического элемента 1-3 такова:

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & L_3 + \frac{c_3}{c_2} L_2 + \frac{c_3}{c_1} L_1 \\ 0 & \frac{c_3}{c_1} \end{vmatrix}, \quad (10)$$

Таким же образом рассчитываются ABCD-матрицы для переотраженных компонент волны. Возвращаясь к рассматриваемому примеру, заметим, что формула (9) является частным случаем общей формулы для гауссова пучка в среде, которая может быть описана ABCD-матрицей в параксиальном приближении для гауссова распределения интенсивности в поперечном сечении:

$$\tilde{v}(\omega, \vec{r}_\perp, z) = \frac{K(\omega) I_0 \tilde{f}(\omega)}{A + B/q_1} \exp\left[-\imath k \frac{r_\perp^2}{2q_0}\right], \quad (11)$$

где q_0 – комплексный параметр гауссова пучка сразу после выхода из области генерации, а q_1 – комплексный параметр гауссова пучка после полного прохождения акустического элемента. Параметры q_0 и q_1 связаны законом ABCD распространения гауссовых пучков:

$$q_0 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}, \quad (12)$$

где A, B, C и D – соответствующие элементы матрицы, описывающей акустический элемент с любым числом слоев. Выражение для начального значения комплексного параметра q_0:

$$q_0 = \frac{i\omega a^2}{2c_1}. \quad (13)$$

Поскольку коэффициент отражения по колебательной скорости плоской продольной волны, падающей перпендикулярно к границам раздела сред 1 и 2 из среды 1:

$$R_v = \frac{v_{1,\text{отр}}}{v_1} = \left(1 - \frac{Z_1}{Z_2}\right) \Big/ \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right). \quad (14)$$

где $Z_1 = \rho_1 c_1, Z_2 = \rho_2 c_2$ – акустические импедансы соответствующих сред;
а коэффициент прохождения по колебательной скорости плоской продольной волны, падающей перпендикулярно к границам раздела сред:

$$T_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{2}{(1 + Z_1/Z_2)}. \quad (15)$$

То, для трех сред рассматриваемого примера:

$$T_v = T_{v,2\to3} \cdot T_{v,1\to2} = \frac{4}{\left(1+\frac{Z_3}{Z_2}\right)\left(1+\frac{Z_2}{Z_1}\right)}, \quad (16)$$

где Z_1, Z_2, Z_3 – акустические импедансы генератора, исследуемого объекта и приемника соответственно.

Подставляя это выражение в (6), получаем формулу:

$$\tilde{v}(\omega,\vec{r}_\perp,z)=\frac{K(\omega)I_0\tilde{f}(\omega)\frac{4}{\left(1+\frac{Z_3}{Z_2}\right)\left(1+\frac{Z_2}{Z_1}\right)}}{1+\left(L_3+\frac{c_3}{c_2}L_2+\frac{c_3}{c_1}L_1\right)\frac{2\imath c_1}{\omega a^2}}\exp\left[-\frac{r_\perp^2}{a^2}\frac{\frac{c_3}{c_1}}{1+\left(L_3+\frac{c_3}{c_2}L_2+\frac{c_3}{c_1}L_1\right)\frac{2\imath c_1}{\omega a^2}}\right], \quad (17)$$

Таким образом, поле на оси ($r_\perp=0$) дается выражением:

$$\tilde{v}(\omega,z)=\frac{\frac{\beta^*\quad -\imath\omega/\omega_a\quad AE_p}{\rho_1 c_p 1+(\omega/\omega_a)^2\pi a^2}\exp\left[-\frac{\omega^2\tau_L^2}{4}\right]\frac{4}{\left(1+\frac{Z_3}{Z_2}\right)\left(1+\frac{Z_2}{Z_1}\right)}}{1+\left(L_3+\frac{c_3}{c_2}L_2+\frac{c_3}{c_1}L_1\right)\frac{2\imath c_1}{\omega a^2}}, \quad (18)$$

Полученное решение показывает, что применение ABCD матриц позволяет описать такие явления, как отражение и преломление, возникающие при распространении акустического импульса. Но при затухании и рассеянии импульса ABCD матрица не меняется, следовательно, для полноценного описания процесса распространения импульса требуется воспользоваться также зависимостью изменения импульса от пройденного расстояния с учетом затухания и дифракционных характеристик среды. Для этого воспользуемся экспериментально полученной зависимостью для затухания:

$$\alpha=\alpha_0\omega^y, \quad (19)$$

где α – затухание в 1/м, α_0 – коэффициент затухания в $\frac{1}{\text{м}}\left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)^{-y}$, ω – циклическая частота, а y – степенной коэффициент затухания, изменяющийся в диапазоне от 0 до 3. Помимо акустического затухания, на изменение формы спектра сигнала влияет звуковая дисперсия. Частотные зависимости затухания и дисперсии связаны уравнениями Крамерса-Кронига. Таким образом, частотная зависимость скорости звука выражается уравнением:

$$\frac{1}{c(\omega_2)}-\frac{1}{c(\omega_1)}=\alpha_0\tan\left(\frac{\pi y}{2}\right)\left(\omega_2^{y-1}-\omega_1^{y-1}\right), \quad (20)$$

где $\mathrm{c}(\omega_2)$ и $\mathrm{c}(\omega_1)$ – скорости на двух разных частотах ω_2 и ω_1 – соответственно. Тогда зависимость волнового числа $k(\omega)$ от частоты, удовлетворяющая условиям (19) и (20), может быть представлена в виде:

$$k(\omega)=\frac{\omega}{\mathrm{c}(\omega)}+\mathrm{i}\alpha_0|\omega|^y+\alpha_0\omega|\omega|^{y-1}\tan\left(\frac{\pi y}{2}\right), \quad (21)$$

В качестве иллюстрации применения метода рассмотрим распространение одной гармоники через двухслойную среду для выделения отдельных преобразований, происходящих в процессе распространения. Предположим, что нам известно состояние этой гармоники $f(\omega)_0$ на момент начала распространения, тогда её состояние после распространения через слой 1 до границы слоев 1-2 можно представить как:

$$f(\omega)_1=f(\omega)_0\cdot e^{-i\cdot k(\omega)\cdot l}, \quad (22)$$

где $k(\omega)$ – частотнозависимое волновое число в слое 1, определенное по формуле (21) при условии, что α_0 и y – параметры слоя 1, а l – толщина этого слоя.

Обозначим P преобразование, описываемое формулой (22). На границе раздела сред для каждой падающей гармоники возникает преломленная и отраженная волны. Запишем прямое N_T и обратное N_R отношение акустических импедансов сред 1 и 2:

$$N_T = \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2}, \tag{23}$$

$$N_R = \frac{\rho_2 \cdot c_2}{\rho_1 \cdot c_1} = \frac{1}{N_T}, \tag{24}$$

Тогда для амплитуд гармоник преломленной $f(\omega)_{12}$ и отраженной $f(\omega)_{11}$ волн на границе 1-2 получим выражения:

$$f(\omega)_{12} = f(\omega)_1 \cdot \frac{2 \cdot N_T}{N_T + 1}, \tag{25}$$

$$f(\omega)_{11} = f(\omega)_1 \cdot \frac{N_R - 1}{N_R + 1}, \tag{26}$$

Обозначим T преобразование, описанное формулой (25), а R – преобразование, описанное формулой (26).

Обозначив типы преобразований, перейдем к рассмотрению акустических импульсов. Отметим, что преобразования, описанные формулами (22, 25, 26), верны только в случае распространения гармоники по оси, перпендикулярной границе раздела сред. Следовательно, импульс волны с плоским фронтом может быть представлен в виде:

$$I = \int_0^\infty f(\omega) \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t}\, d\omega, \tag{27}$$

а его преобразования $P,\ T,\ R$ соответственно:

$$P\colon I_1 = \int_0^\infty f(\omega)_0 \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \cdot e^{-i \cdot k(\omega) \cdot l}\, d\omega, \tag{28}$$

$$T\colon I_1 = \int_0^\infty f(\omega)_0 \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \cdot \frac{2 \cdot N_T}{N_T + 1}\, d\omega, \tag{29}$$

$$R\colon I_1 = \int_0^\infty f(\omega)_0 \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \cdot \frac{N_R - 1}{N_R + 1}\, d\omega, \tag{30}$$

При таком распространении отсутствует эффект дифракции. Для того, чтобы его учесть, рассмотрим волну с гауссовым распределением в поперечном сечении. Тогда становится возможным применение метода ABCD-матриц. Гауссов пучок в данном случае характеризуется комплексным параметром $q(\omega)$, начальное значение которого $q(\omega)_0$. Тогда преобразования (28 – 30) получают дополнительный множитель под интегралом:

$$\mathrm{c}(q, M) = \frac{q(\omega)}{A \cdot q(\omega) + B}, \tag{31}$$

где M – ABCD-матрица, а A и B – её элементы.

Следовательно, преобразования для импульса можно представить в виде:

$$P: \begin{cases} I_1 = \int_0^\infty f(\omega)_0 \cdot e^{i\cdot\omega\cdot t} \cdot e^{-i\cdot k(\omega)\cdot l} \cdot \mathrm{c}(q(\omega), M_P)\, d\omega \\ M_P = M_0 \cdot \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{cases}, \tag{32}$$

$$T: \begin{cases} I_1 = \int_0^\infty f(\omega)_0 \cdot e^{i\cdot\omega\cdot t} \cdot \frac{2\cdot N_T}{N_T+1} \cdot \mathrm{c}(q(\omega), M_T)\, d\omega \\ M_T = M_0 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{c_2}{c_1} \end{pmatrix} \end{cases}, \tag{33}$$

$$R: \begin{cases} I_1 = \int_0^\infty f(\omega)_0 \cdot e^{i\cdot\omega\cdot t} \cdot \frac{N_R-1}{N_R+1} \cdot \mathrm{c}(q(\omega), M_R)\, d\omega \\ M_R = M_0 \end{cases}, \tag{34}$$

где M с индексами P, T, R обозначена ABCD матрица после соответствующего преобразования.

Поскольку при распространении акустического импульса через слоистую среду образуется множество переотраженных импульсов, для моделирования полного сигнала, прошедшего через такую среду, требуется учесть каждый из импульсов. Следовательно, полный сигнал можно представить как:

$$G = \sum_1^N I_n\,, \tag{35}$$

где N – количество переотраженных импульсов, дошедших до точки измерения сигнала; а I_n - представление единичного импульса, преобразованного средой в процессе распространения, которое равно прошедшему через преобразования $P,\ T,\ R$ импульсу I_0, причем результат зависит от того, как конкретно распространялся данный импульс.

Таким образом, при помощи функций (32-35) может быть смоделировано распространение любого акустического сигнала с гауссовой формой в поперечном сечении через слоистую среду.

На основе вышеприведенных теоретических выкладок **в третьей главе** разработан алгоритм моделирования распространения акустических сигналов с гауссовым распределением в поперечном сечении и реализующая его программа для ЭВМ.

Процесс создания алгоритма был разделен на три этапа. На первом этапе при распространении сигнала учитывалось только затухание, не зависящее от частоты. Полученные таким способом результаты сильно отличались от экспериментальных данных, что показало необходимость учета большего

числа факторов, влияющих на сигнал в процессе распространения. На втором этапе алгоритм был адаптирован под метод ABCD матриц для учета дифракции. Такая доработка существенно улучшила результаты моделирования, но между экспериментальными и модельными данными все еще наблюдались существенные отличия. Поэтому на третьем этапе были учтены дисперсия фазовой скорости и частотная зависимость затухания, что дало наилучшие результаты.

В качестве демонстрации рассмотрим принцип построения модели на основе введенных во второй главе типов преобразований на примере четырехслойной среды, где 1-ый слой представлен оптико-акустическим генератором, 2-ой и 3-ий некоторыми однородными средами, а 4-й пьезопреобразователем-приемником.

Во-первых, поскольку подразумевается, что вышеописанная четырехслойная модель находится в однородной среде с гораздо более низким акустическим импедансом, то из двух импульсов, образующихся в процессе генерации, можно учесть только тот, который проходит через исследуемую среду. Спектр этого импульса обозначим G.

Во-вторых, любой из трех типов преобразований можно представить в виде комбинации множителя к спектру преобразуемого импульса и изменения его ABCD матрицы. Причем как множитель, так и изменение ABCD матрицы полностью определяются характеристиками слоя или слоев, в которых происходит преобразование.

В итоге, используя введенные обозначения, а также индексы для указания слоев, в которых происходят преобразования, распространение импульса через четырехслойную среду, можно представить так:

$$I_0 = G \cdot P_1 \cdot T_{12} \cdot P_2 \cdot T_{23} \cdot P_3.$$

Стоит отметить, что выражение I_0 описывает лишь часть сигнала, а конкретнее первый импульс, пришедший к приемнику, в связи с тем, что на границах 1-2, 2-3, 3-4, возникли отраженные импульсы. Тем же способом представим их распространение с переотражением в сторону приемника от ближайшей границы:

$$I_{121c} = G \cdot P_1 \cdot R_{12} \cdot P_1 \cdot R_{1c} \cdot P_1 \cdot T_{12} \cdot P_2 \cdot T_{23} \cdot P_3,$$
$$I_{2321} = G \cdot P_1 \cdot T_{12} \cdot P_2 \cdot R_{23} \cdot P_2 \cdot R_{21} \cdot P_2 \cdot T_{23} \cdot P_3,$$
$$I_{3432} = G \cdot P_1 \cdot T_{12} \cdot P_2 \cdot T_{23} \cdot P_3 \cdot R_{34} \cdot P_3 \cdot R_{32} \cdot P_3,$$

где индексы при I указывают последовательность переотражений, обозначая каждыми двумя цифрами границы раздела сред и направление перехода этой границы, а индекс c обозначает среду, вмещающую модель.

Поскольку каждый из этих импульсов на границах слоев также создает отраженные импульсы, введем понятие глубины переотражения, понимаемое как количество переотражений импульса с момента генерации. Из представленной схемы видно, что распространение импульса через слоистую среду создает бесконечное множество переотраженных импульсов, а также, что количество создаваемых импульсов растет в геометрической прогрессии с увеличением глубины переотражения и количества слоев.

Акустический сигнал, прошедший через среду, представляет собой суперпозицию всех указанных импульсов, а, следовательно, корректное моделирование возможно только при учете бесконечного числа импульсов. В связи с нецелесообразностью реализации такого алгоритма учтем, что в процессе любого из преобразований импульс теряет энергию, тем самым полностью затухая к некоторому моменту. Тогда можно выбрать такую глубину переотражений, при которой сохраняется достаточная информативность сигнала и приемлемая сложность расчета. Исходя из вышесказанного, акустический сигнал, прошедший через среду, можно представить, как $\sum I_i$, где I_i - все импульсы до некоторой заранее выбранной глубины переотражений.

Для оценки приемлемой глубины переотражений были проведены эксперименты на модельных образцах. Эксперименты показали, что при глубине переотражений, равной 5, среднеквадратическое отклонение между смоделированным сигналом и экспериментальным сигналом, нормированное на экспериментальный сигнал не превышает 3%, а при глубине переотражений, равной 10, вышеописанное среднеквадратическое отклонение не превышает 1%.

Примем максимальную глубину переотражения равной 2. Тогда суммарный сигнал будет иметь вид:

$$\sum I = I_0 + I_{121c} + I_{2321} + I_{3432},$$

Дальнейшее Фурье-преобразование этого сигнала даст временную форму акустического сигнала, зарегистрированную преобразователем.

Все вышеприведенное легло в основу программы для ЭВМ, позволяющей:

1) создать модель слоистой среды, в которой задаются размеры слоев и их физико-механические свойства (плотность, скорость распространения звука)

2) задать параметры генерации ультразвукового импульса, включая начальный радиус пучка, длительность лазерного излучения и коэффициент поглощения света в среде генератора;
3) смоделировать генерацию и распространение ультразвукового импульса с учетом частотнозависимого затухания, дифракции и дисперсии фазовой скорости в заданной слоистой среде и получением графического представления временной и спектральной форм сигнала.

В качестве примера работы программы на рисунках 1-3 представлены результаты моделирования распространения акустического сигнала через пластину аргиллита толщиной 3 мм и плотностью 2133 кг/м^3, скорость звука в которой равна 5337 м/с.

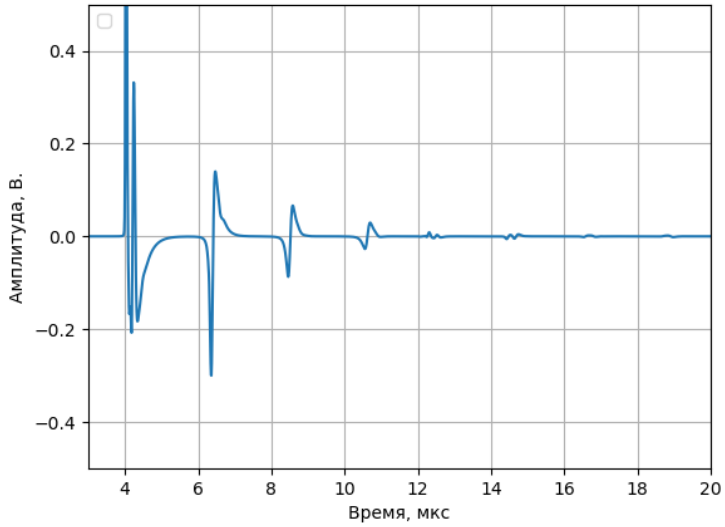


Рисунок 1 - Временная форма сигнала, прошедшего через пластину аргиллита

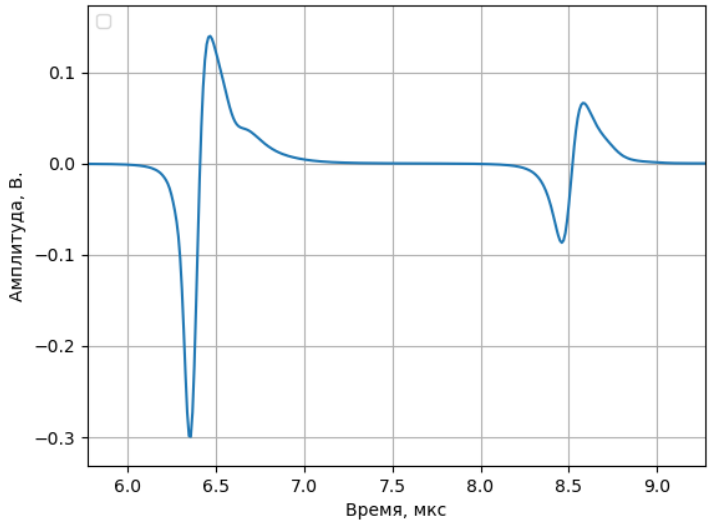


Рисунок 2 - Время вступления первого (1) и второго (2) донного сигнала в пластине аргиллита

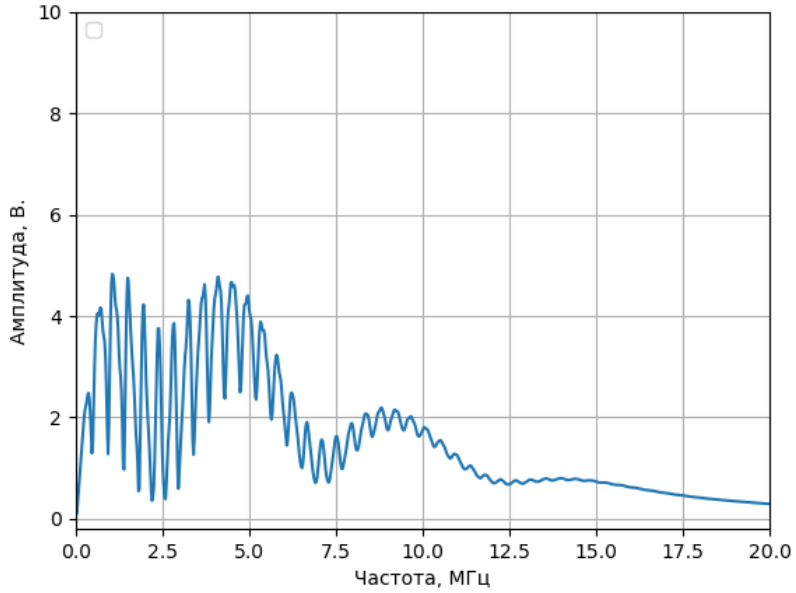


Рисунок 3 - Спектр прошедшего через пластину аргиллита сигнала

На рисунках 4-6 представлены результаты моделирования распространения акустического сигнала через пластину известняка толщиной 3 мм и плотностью 2878 кг/м^3, скорость звука в которой равна 4528 м/с.

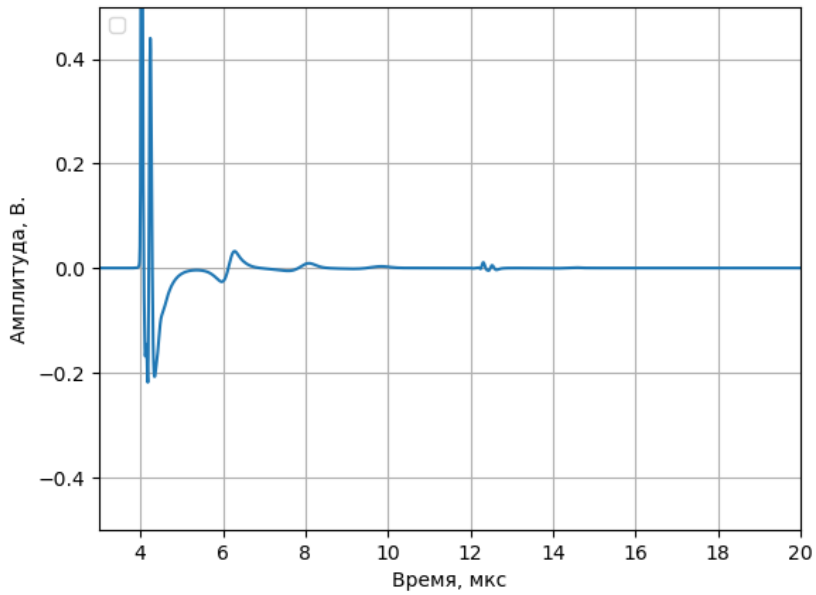


Рисунок 4 - Временная форма сигнала, прошедшего через пластину известняка

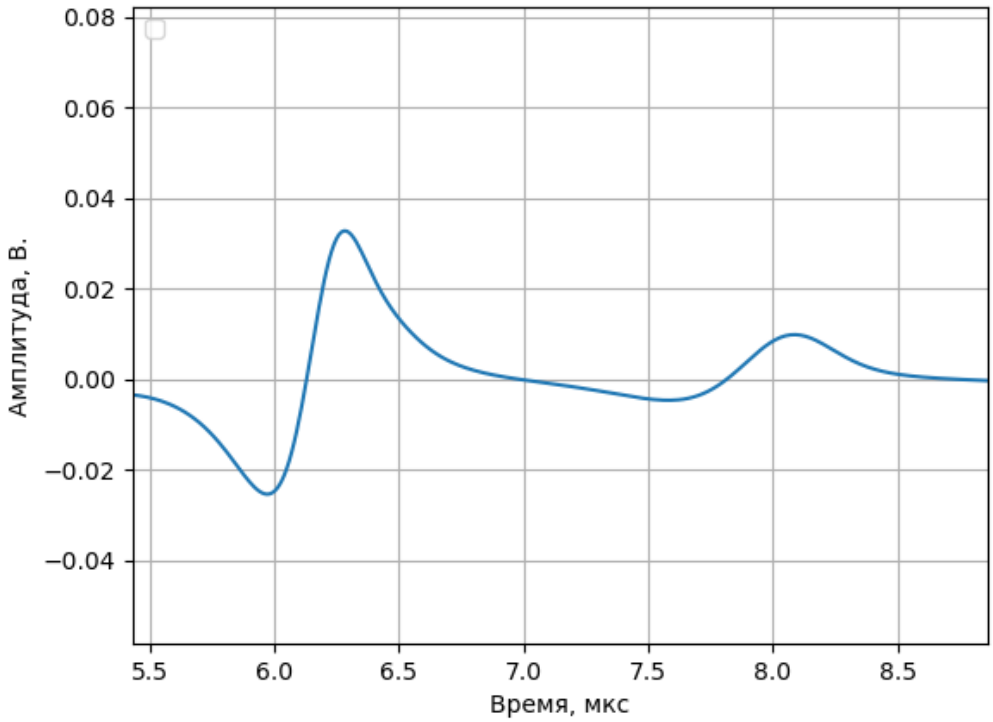


Рисунок 5 - Время вступления первого (1) и второго (2) донного сигнала в пластине известняка

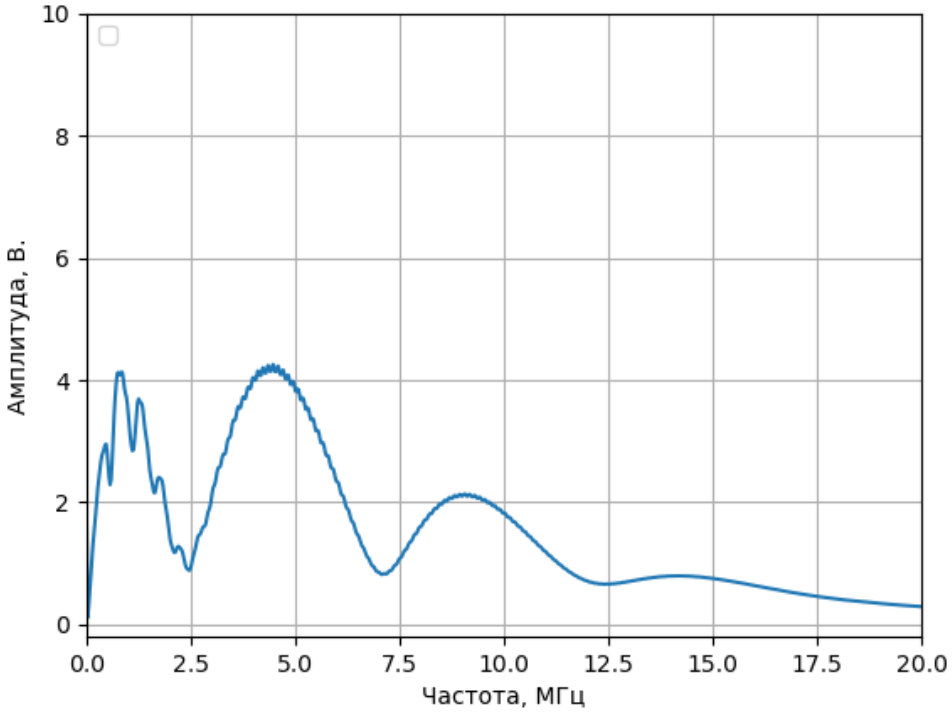


Рисунок 6 - Спектр прошедшего через пластину известняка сигнала

В четвертой главе описывается предлагаемый метод исследования структуры геоматериалов, обосновывается его применимость и проводится его верификация другими методами.

Предлагаемый метод определения внутренней структуры геоматериала основывается на анализе возникших в результате прохождения через исследуемый неоднородный образец изменений в падающем на него акустическом сигнале. Для анализа этих изменений используется разложение на гармоники падающего (исходного\начального) сигнала, который представляет собой одиночный акустический импульс заданной длительности и временной формы. Далее рассматривается распространение каждой гармоники данного импульса с учетом дифракции, дисперсии фазовой скорости, частотнозависимого затухания на основе применения ABCD матриц. Восстановленный с помощью быстрого Фурье-преобразования суммарный сигнал представляет собой суперпозицию всех переотраженных на неоднородностях и границах раздела сред импульсов. Такое представление необходимо для анализа характеристик неоднородной среды как комплексного объекта, состоящего из множества однородных подобъектов, что и позволяет определить внутреннюю структуру геоматериала.

Следует отметить, что именно применение ABCD матриц позволяет разделить сложную картину, состоящую из большого числа перекрывающихся импульсов, на отдельные импульсы. Таким образом возможно посредством подбора характеристик, по которым строится модельный сигнал, получить информацию о свойствах отдельных элементов среды, расположенных по направлению распространения падающего импульса. Применение алгоритмов минимизации отклонений значений амплитуд в спектрах или временных формах акустических импульсов позволяет получить характеристики каждого элемента среды с незначительными погрешностями, что гарантирует определение внутренней структуры геоматериала, а также расположения, размера и характера его неоднородностей.

С целью верификации метода проведены эксперименты на специально синтезированных модельных образцах, один из которых представляет собой две склеенные между собой пластины аргиллита. На одной из этих пластин выполнен пропил глубиной ~300 мкм (см. рис. 9). Пластины склеены так, что пропил находится внутри образца и полностью заполнен клеем.

На рисунках 5 и 6 приведены графики временной формы для смоделированного и измеренного на изготовленном образце сигнала.

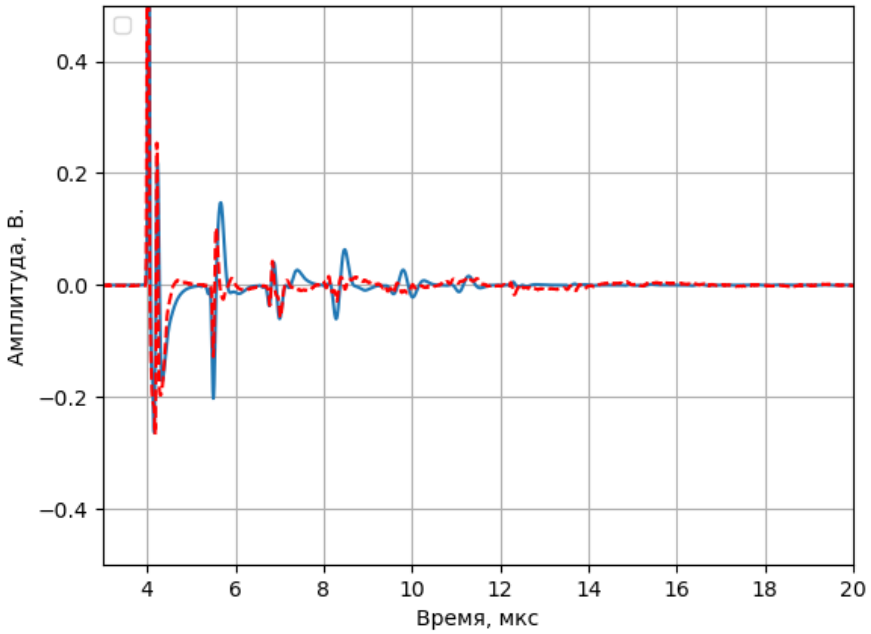


Рисунок 5 - Временная форма сигнала сканирования области, в которой отсутствует пропил. Красной линией обозначен сигнал, измеренный на изготовленном образце, синей – смоделированный сигнал

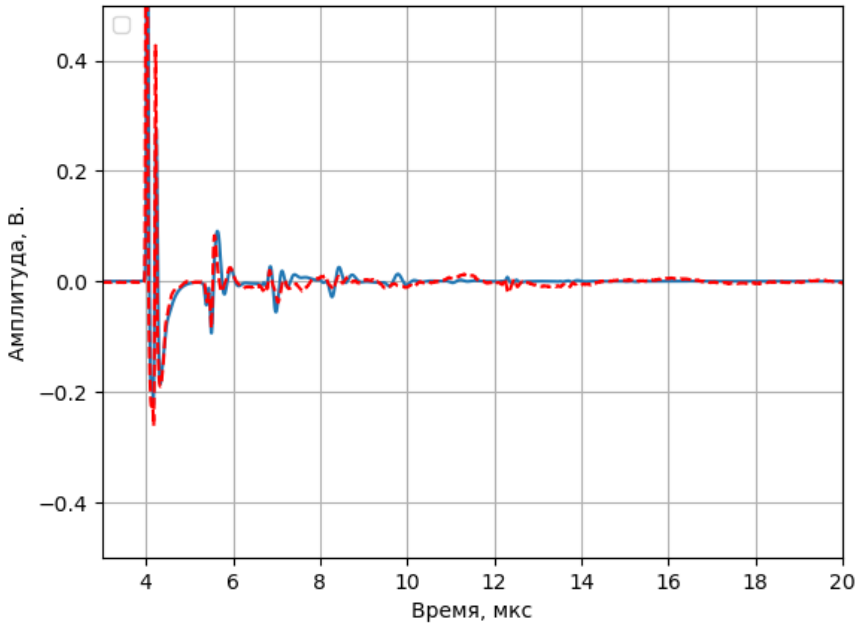


Рисунок 6 - Временная форма сигнала сканирования области, в которой присутствует пропил. Красной линией обозначен сигнал, измеренный на изготовленном образце, синей – смоделированный сигнал

На рисунках 7 и 8 приведены одномерные изображения внутренних структур, определенных по сигналам в областях образца без пропила и с

пропилом соответственно. На указанных рисунках по оси X отложено расстояние от поверхности образца по направлению сканирования, по оси Y - относительная апертура, отсчитываемая от оси пучка.

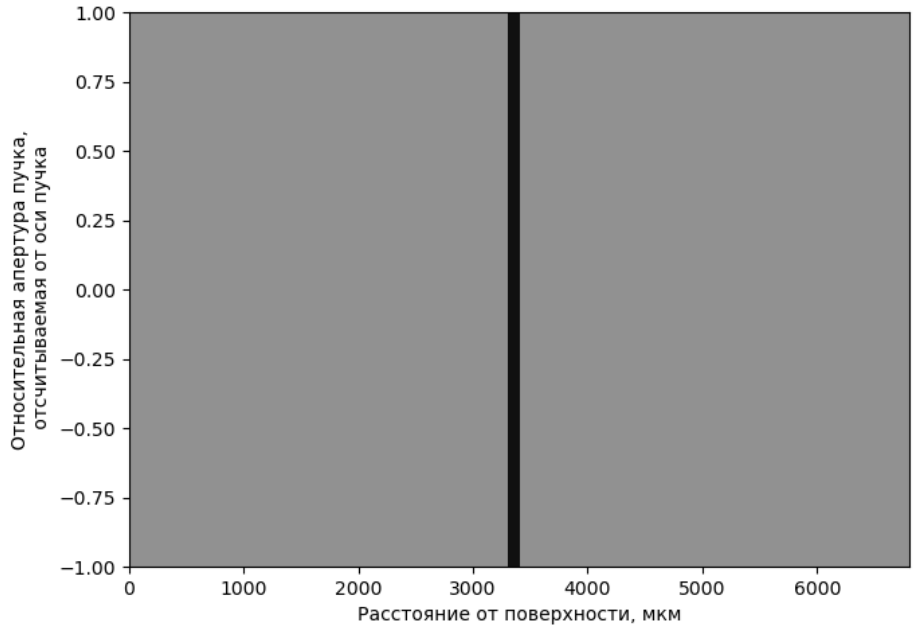


Рисунок 7 - Слоистая структура, определенная по сигналу в области без пропила

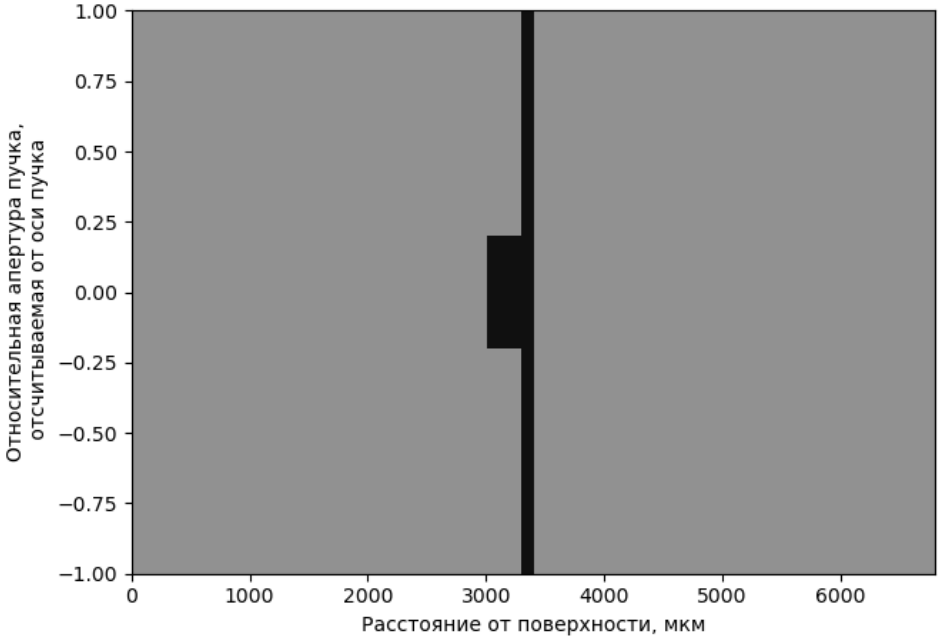


Рисунок 8 - Слоистая структура, определенная по сигналу в области, содержащей пропил

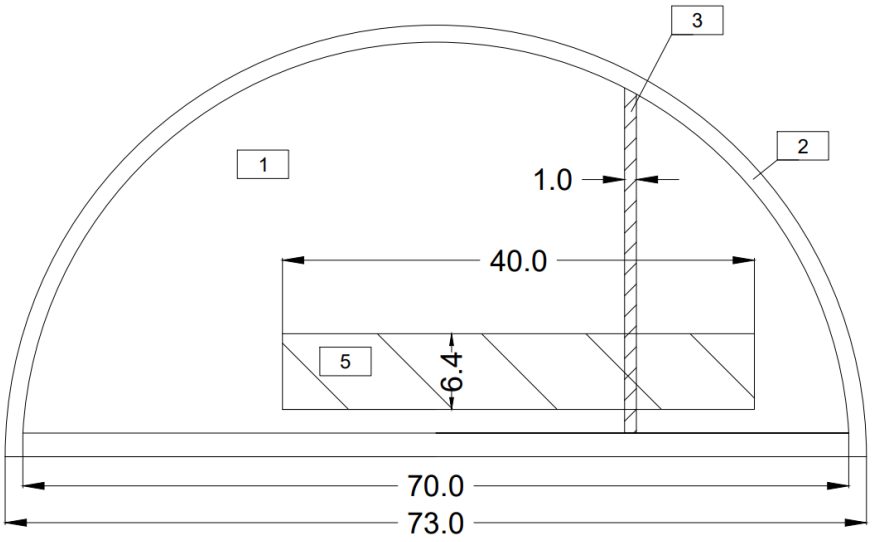
Однако возможны случаи, когда луч, создаваемый излучателем, имеет размер в поперечном сечении больший, чем размер неоднородности, тогда искажается только часть сигнала. Поскольку приемник принимает только суммарный сигнал, в таких случаях судить о размере неоднородности по прошедшему сигналу будет нельзя, и возникает необходимость производить измерения в нескольких близких точках. Результат определения изображения внутренней структуры образца для одного из таких случаев представлен на рис. 10.

Сравнение численных значений характеристик, полученных в результате применения метода и измеренных традиционными способами, приведено в таблице.

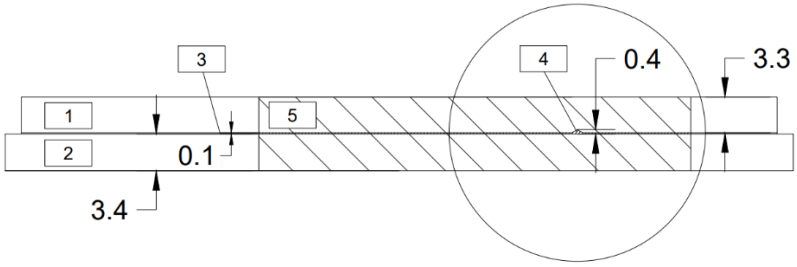
Таблица - Численные значения характеристик (номера в шапке таблицы соответствуют обозначениям рис. 9)

Характеристика	Аргиллит (1)	Неоднородность (4)	Клеевой слой (3)	Аргиллит (2)	Полный образец
Расчетные значения					
Скорость звука, м/с	5337	1428	1428	5325	5 271
Плотность, кг/м^3	2133	887	887	2133	2128
Толщина, мм	3.30	0.30	0.10	3.40	6.80
Измеренные значения					
Скорость звука, м/с	5354	-	1452	5344	5 292
Толщина, мм	3.30	0.30	-	3.40	6.80

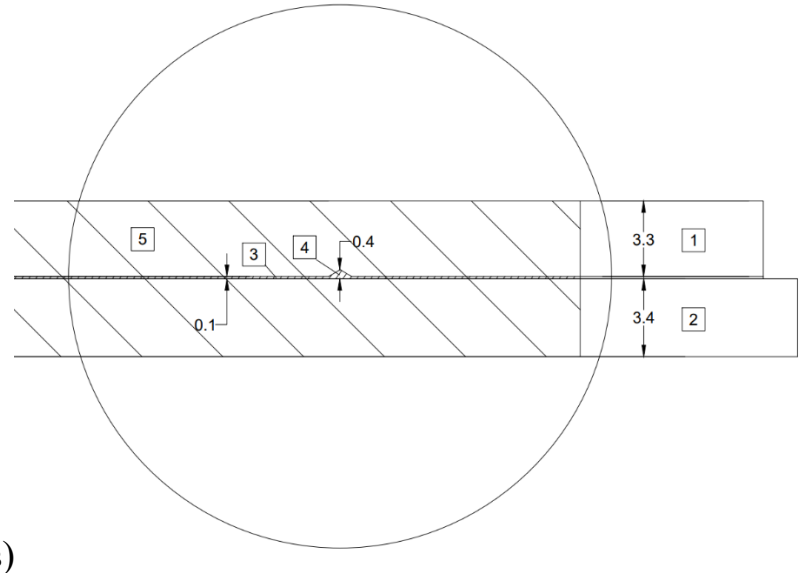
Полученные результаты показали хорошую сходимость характеристик, измеренных на модельных образцах, с реальными значениями.



а)



б)



в)

Рисунок 9 - Схема образца: **а** - вид сверху; **б** – вид сбоку; **в** – увеличенная область пропила. Размеры указаны в мм

1. Пластина аргиллита с неоднородностью
2. Пластина аргиллита без неоднородности
3. Клеевой слой
4. Область пропила
5. Область сканирования

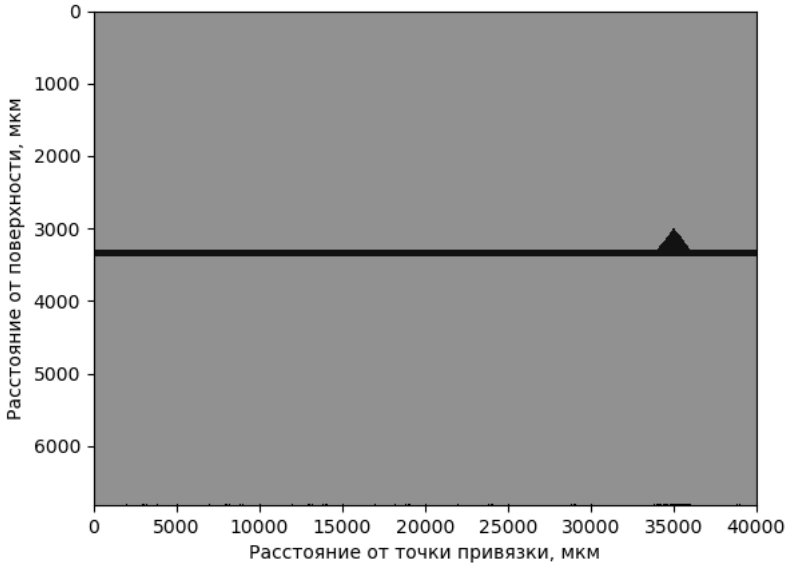


Рисунок 10 - Изображение внутренней структуры образца, полученное расшифровкой изменений в прошедшем через образец широкополосном акустическом сигнале

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований зависимости изменений широкополосных акустических сигналов, прошедших через исследуемый геоматериал, учитывающих рассеянные, отраженные от неоднородностей и прошедшие через исследуемую среду импульсы, решена актуальная научная задача обоснования и разработки метода исследования структуры геоматериалов, что имеет важное значение для развития горной геофизики.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. Показано, что существующие ультразвуковые методы структуроскопии не учитывают влияние эффекта затухания, дисперсии фазовой скорости и явления дифракции при определении скорости распространения акустического сигнала и наличия неоднородностей, что не позволяет определить внутреннюю структуру исследуемых объектов с достаточной степенью точности.
2. Разработана теоретическая модель, описывающая процесс распространения широкополосных ультразвуковых импульсов с гауссовым распределением давления в поперечном сечении в слоистой среде на основе метода ABCD-матриц.

3. На основе компьютерного и физического моделирования установлены закономерности влияния строения, структурных неоднородностей и физико-механических свойств геосреды на изменения зондирующего сигнала.

4. Создан алгоритм обработки широкополосных ультразвуковых сигналов, прошедших через гетерогенную среду, а также рассеянных и отраженных от ее неоднородностей, позволяющий определить её физико-механические характеристики, и реализующая его программа на ЭВМ, зарегистрированная в Реестре программ для ЭВМ (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU №2020610531 от 15.01.2020).

5. Разработан метод исследования структуры образцов недиспергированных геоматериалов на основе широкополосной ультразвуковой спектроскопии с использованием ABCD-матриц.

6. Проведены испытания указанного выше метода на специально синтезированных модельных образцах и образцах горных пород, а также верификация метода другими методами неразрушающего контроля.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях из Перечня ВАК РФ и в изданиях, индексируемых в наукометрических базах WoS и Scopus

1. Пашкин А. И., Винников В. А. Моделирование распространения лазерно-ультразвукового зондирующего импульса в слоистой среде методом ABCD-матриц // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6. – С. 140–150. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-140-150.

2. A. I. Pashkin. Use of ABCD-matrix method for the simulation of laser-ultrasonic probing pulse propagation in a layered medium of the optical-acoustic transducer 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 684 012025 DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012025.

3. Пашкин А. И. Определение оптимальных характеристик низкочастотного оптико-акустического преобразователя для диагностики геоматериалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2021. - №4-1. – С. 62-72. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_62.

4. Пашкин А. И., Винников В. А., Черепецкая Е. Б. Метод определения внутренней структуры геосреды с использованием ABCD-матриц в теневом режиме // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 8. – С. 14–26. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_14.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

5. Программа для моделирования генерации и распространения оптико-акустических сигналов в слоистых средах методом ABCD-матриц; Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU №2020610531/ Пашкин А.И. (RU); заявитель ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС»; заявл. 11.12.2019 №2019666270 (Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 15.01.2020).