

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

На правах рукописи

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

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор, профессор кафедры ФизГео
Черепецкая Елена Борисовна

Москва, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. Анализ современного состояния методов определения физико-механических свойств и внутренней структуры образцов горных пород	8
1.1 Актуальность исследуемого направления	8
1.2 Рентгеновская томография	10
1.3 Нейтронная томография	12
1.4 Ядерный магнитный резонанс	13
1.5 Ультразвуковые методы	15
1.6 Постановка задач исследования	19
Выводы	20
Глава 2. Теоретические основы моделирования распространения акустических волн с учетом эффектов дифракции, дисперсии фазовой скорости и частотнозависимого затухания	21
2.1 ABCD матрицы в акустике. Введение, акустические элементы и примеры	21
2.2 Базовые и сложные акустические элементы	25
2.3 Учет дифракции на примере генерации акустического импульса и его распространения в оптико-акустическом преобразователе на основе ABCD матриц	26
2.4 Влияние дисперсии фазовой скорости и частотнозависимого затухания при распространении акустической волны. Характерные преобразования волны в процессе распространения	30
2.5 Преобразования акустического сигнала с учетом эффектов дифракции, дисперсии фазовой скорости и частотнозависимого затухания	33
Выводы	34
Глава 3. Алгоритм моделирования распространения акустических сигналов и реализующая его программа для ЭВМ.	35
3.1 Описание метода моделирования	35
3.2 Учет особенностей образца и его контакта с излучателем и приемником	41
3.3 Обоснование принятых программных решений и оценка производительности разработанной программы	42
Выводы	46
Глава 4. Метод исследования структуры геоматериалов, обоснование его применимости и верификация.	47
4.1 Описание метода определения внутренней структуры геоматериала	47
4.2 Перечень образцов, исследованных предложенным методом	48

4.3 Экспериментальные исследования предложенным методом на специально подготовленных образцах горных пород и верификация их результатов	49
4.3.1 Образец “AcA”	49
4.3.2 Образец “A1L”	54
4.3.3 Образец “AM”	64
4.3.4 Образец “AQM”	69
4.3.5 Образец “AcM”	73
4.3.6 Образец “L1L”	84
Выводы.....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	95
Приложение А. Листинг программы.....	104

ВВЕДЕНИЕ

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 геоматериалов.

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.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность научному руководителю Черепецкой Елене Борисовне за постоянное внимание, менторство и ценные советы. Также автор благодарен сотрудникам лаборатории ЛУМИИ НИТУ «МИСиС» за сотрудничество и помощь в проведении исследований. Автор признателен зав. каф. ФизГео – Винникову Владимиру Александровичу за ценные советы и замечания, полученные в ходе написания и обсуждения работы.

Глава 1. Анализ современного состояния методов определения физико-механических свойств и внутренней структуры образцов горных пород

1.1 Актуальность исследуемого направления

Исследования внутренней структуры важны как в горном деле и нефтегазовом производстве, так и при разработке новых материалов, а также в области контроля качества изделий. Для решения некоторых задач достаточно определить расположение и характер, а иногда и просто наличие дефектов, для других задач важно также определить физико-механические свойства исследуемого объекта и его внутреннюю структуру. Существующие методы позволяют оценить состояние массива горных пород, в том числе пород коллекторов, при помощи полевых или лабораторных исследований [1-12].

Полевые испытания в основном применяются при геологоразведочных работах и, в большинстве случаев, позволяют лишь оценить внутреннюю структуру массива и определить некоторые особенности его строения, но не дают достаточно точных данных о слагающих его породах, их физико-механических характеристиках и неоднородностях. Таким образом, для получения дополнительных сведений всегда требуются лабораторные исследования образцов горных пород.

Оптимизация работ по разработке месторождений требует анализа физических и химических процессов, протекающих в массиве горных пород. Прогнозирование и моделирование этих процессов невозможно без получения широкого спектра данных о массиве. В горном деле это в первую очередь физико-механические свойства и структура составляющих массив пород. Все эти характеристики возможно определить только при анализе керна (образца) в лабораторных условиях.

Программа анализа керна включает в себя отбор и транспортировку в лабораторию образцов и определение основных параметров пород,

складывающих массив. Перенос полученных данных на полную модель месторождения имеет большое значение для выработки программы последующих лабораторных исследований, а также планирования технологий добычи.

Лабораторные исследования образцов проводятся методами рентгеновской и нейтронной томографии, акустической и оптической микроскопии, ядерного магнитного резонанса, термографией и ультразвуковыми методами. Вышеперечисленные методы позволяют получать информацию о различных характеристиках массива горных пород и применяются комплексно для составления максимально полной информации о месторождении.

В последнее время получила развитие технология цифрового моделирования керна. Под цифровым моделированием керна подразумевается моделирование физических и химических процессов, происходящих в нем, при заданной структуре и физико-механических и химических свойствах [13-27]. В связи с развитием компьютерных технологий данная технология получает все большее распространение. Исследования возможности применения такого подхода проводились еще в 1980-х годах, но практическое применение стало возможным гораздо позже [19-28]. Развитие технологий, связанных с цифровым моделированием керна, в России началось только десять лет назад [29, 30].

Особенно актуально создание модели «цифровой керна» становится в случае, когда извлечение керна происходит с больших глубин и есть только образцы горных пород малого размера [31]. Также использование данной модели позволяет частично компенсировать нехватку образцов для исследования, например при изучении слабых грунтов и других малопригодных для проведения физических экспериментов горных пород.

Кроме того, численное моделирование на основе модели «цифрового керна» позволяет значительно уменьшить погрешности, возникающие при определении физико-механических свойств горных пород.

Наличие ошибочных результатов исследований образцов горных пород – важная проблема при разработке нефтегазоносных месторождений. Часто возникает ситуация, когда невозможно обосновать протекание процессов в массиве на микроуровне, имея только результаты лабораторных исследований. Поэтому использование цифровой модели может повысить достоверность определения геологического строения массива, точность результатов при моделировании, а также повысить эффективность разработки месторождения [32]. Добавление результатов цифрового моделирования к данным геофизических исследований позволит прогнозировать ряд характеристик массива. Как отмечалось в работе [33] проведенный за последнее десятилетие перевод геофизической информации в цифровой вид привел к тому, что компьютерные методы могут применяться ко многим типам геофизических данных с незначительными временными затратами.

1.2 Рентгеновская томография

Метод рентгеновской томографии базируется на следующих физических принципах [34]. Высокочастотное электромагнитное излучение формируется в вакуумированной разрядной трубке, в которой находятся два электрода - катод и анод. Через катод, выполненный из вольфрамовой проволоки, пропускается электрический ток, под действием которого нить нагревается до температуры порядка 2000 °С. Из катода за счет термоэмиссии вылетают электроны, которые при распространении к аноду ускоряются электрическим полем и приобретают значительные скорости. При попадании на анод в результате торможения электронов возникает рентгеновское излучение. Полученное излучение фокусируется специальной оптикой Киркапатрика-Бауа и направляется на исследуемый объект, который размещается на специальном столике, допускающим поворот образца. В зависимости от коэффициента поглощения рентгеновского излучения, который определяется плотностью отдельных элементов объекта, получают

полутонные изображения отдельных областей и формируют серию двумерных снимков горной породы. Специальные математические алгоритмы позволяют собирать 2D изображения в 3D модель. При этом процесс обработки изображений требует значительных вычислительных мощностей [35]. Первые лабораторные исследования методом рентгеновской компьютерной томографии были проведены в 1963 году и с 80-х годов прошлого века получил широкое распространение [36]. Развитие цифрового моделирования зерна стимулировало в последние два десятилетия применение данного метода для исследования структуры горных пород [35,37,38]. Цифровая модель, полученная с помощью рентгеновской компьютерной томографии, применяется для прогнозирования петрофизических характеристик пород-коллекторов. Метод рентгеновской томографии работает на разных масштабных уровнях. При изучении полноразмерного зерна (диаметром до 80 мм и длиной в десятки сантиметров) разрешение составляет десятки микрон для образцов различных литографических разностей [39-43]. Уменьшение размера образца сопровождается повышением разрешающей способности аппаратуры. В работе [44] показано, что разрешающая способность компьютерной томографии может достигать 70 мкм для зерна размером 100 мм в диаметре, что позволяет выявить литологические разности, поры, зоны трещиноватости. Минимально разрешимые элементы составляют 20 мкм, если диаметр образцов 30 мм. Это дает возможность изучать структурные особенности геоматериала и геометрию строения пустотного пространства. Минимально достижимая разрешающая способность в 7 мкм наблюдается для образцов размером порядка 10 мм. Такое разрешение дает возможность исследовать минеральный состав образцов горных пород, геометрию пустотного пространства, идентифицировать закрытую и открытую пористость, тип цемента и другие параметры.

Высокое разрешение при использовании образцов малых размеров позволяет изучать для пород-коллекторов наличие и распределение остаточной водонасыщенности [45].

Одним из преимуществ метода рентгеновской томографии является то, что в результате проведения экспериментов геоматериал не подвергается разрушению. Это означает, что образцы можно использовать при дальнейших исследованиях и сопоставлять результаты рентгеновской томографии с данными, полученными другими методами.

К недостаткам описываемого метода следует отнести сложность используемой аппаратуры и значительную трудоемкость обработки результатов исследований. Кроме этого, высокую разрешающую способность можно получить лишь для образцов малых размеров. В связи с этим перенос информации о внутренних особенностях пустотного пространства, полученных для образцов малых размеров, на массив не всегда корректен вследствие проявления масштабных эффектов.

1.3 Нейтронная томография

Метод нейтронной томографии заключается в получении нейтронных изображений исследуемых объектов, где различие в нейтронных сечениях поглощения для разных элементов дает информацию о внутреннем распределении неоднородностей исследуемых материалов. При нейтронной томографии выполняется объемная реконструкция внутреннего строения исследуемого объекта из набора отдельных двумерных изображений, полученных при различных угловых положениях образца относительно направления нейтронного пучка.

Нейтронная томография при изучении структуры и свойств гетерогенных сред использует особенности взаимодействия нейтронного излучения с веществом. Заряд электронной оболочки атома не влияет на амплитуду рассеяния нейтронов, как это имеет место в случае гамма- и

рентгеновского излучений, что позволяет применять нейтронное излучение для диагностики элементов с малым зарядом, где оно оказывается значительно более чувствительным, чем указанные излучения. Более того, наличие у нейтрона магнитного момента делает этот вид излучения незаменимым при изучении магнитных свойств горных пород. Отсутствие заряда у нейтрона приводит к тому, что данный тип излучения отличается более высокой проникающей способностью в геоматериалах, что дает возможность зондировать значительно большие глубины, чем при использовании рентгеновского излучения. Нейтронная томография позволила восстановить объемный металлический «каркас» метеорита, не разрушая столь ценный объект исследования. Минимальный размер неоднородностей составлял 200 мкм, время одного измерения – 10 с [46].

Достоинства и недостатки данного метода схожи с таковыми у рентгеновской томографии, так как используемые подходы к получению данных очень близки. Как уже отмечалось выше, в отличие от рентгеновской томографии нейтронная обладает более высокой проникающей способностью. Но, следует отметить, что существует ряд объективных препятствий на пути широкого практического применения нейтронной радиографии и томографии. Прежде всего, это относительная недоступность исследовательских ядерных реакторов. Кроме того, эти сложнейшие установки требуют для обслуживания многочисленного персонала высокой квалификации.

1.4 Ядерный магнитный резонанс

За открытие ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в 1944 году была присуждена Нобелевская премия, а уже с шестидесятых годов XX века данное явление широко используется при исследовании свойств горных пород и в особенности пород-коллекторов. Начинает разрабатываться аппаратура, используемая не только в лабораторных условиях, но и при скважинном каротаже. Основопологающим принципом ЯМР является то, что ядра

обладают магнитным моментом, на который можно воздействовать электромагнитным полем. Магнитный момент ядра определяется двумя параметрами: спином ядра и гиромагнитным отношением γ , равным отношению магнитного момента ядра к спину. Ядра называются активными по отношению к ЯМР, если их спин отличен от нуля и имеет относительно высокое значение гиромагнитного отношения. Следует отметить, что наибольшим значением гиромагнитного отношения обладает ядро водорода. При помещении таких ядер в магнитное с индукцией β_0 наблюдается прецессия ядерных спинов вокруг магнитного поля с Ларморовой частотой ω , равной $\omega = \gamma\beta_0$. Поскольку, как отмечалось выше, наибольшее γ у атома водорода, то ЯМР чувствителен к наличию пластовых флюидов в горных породах [47-54].

При отсутствии магнитного поля моменты ядер флюидов в образцах пород коллекторов ориентированы в пространстве хаотично. Если включить постоянное магнитное поле происходит ориентация спиновых ядер и они начинают прецессировать вокруг вектора магнитной индукции. Поскольку вокруг вектора магнитной индукции включенного магнитного поля прецессирует достаточное количество ядер, то в объёме образца возникает намагниченность, которая и регистрируется аппаратурой ЯМР. Величина регистрируемого сигнала зависит от количества и типа флюидов в образце породы-коллектора. Время, в течение которого намагниченность образца выходит на насыщение, называется временем релаксации. Поскольку различные флюиды содержат различное количество ядер водорода и других обладающих отличным от нуля спином то регистрируются различные времена релаксации [53]. Для получения более точной информации о флюидах используется еще и переменное магнитное поле, которое возбуждается переменным электрическим током в электромагнитной катушке. Если приложить переменное магнитное поле, которое направлено перпендикулярно статическому, вектор намагниченности образца меняет свое направление. Он становится перпендикулярен к первоначальному. Ядра прецессирующих

атомов поглощают энергию, что приводит к их переходу в высокоэнергетическое состояние. Более того, наличие двух полей (постоянного и переменного) способствует тому, что спины ядер прецессируют в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Таким образом наблюдается процесс поглощения энергии электромагнитного поля, который связан с переориентацией спинов ядер. Этот процесс и называется ЯМР [54]. Современной аппаратуре применяются постоянные и переменные импульсные поля, меняется полярность данных полей, измеряются соответствующие времена релаксации при включении магнитных полей.

Основным достоинством данного метода является качество и количество информации о поровом пространстве, возможность определения таких параметров как коэффициенты пористости, общий объем порового пространства и размеры пор.

К недостаткам следует отнести необходимость точной калибровки скважинной аппаратуры ЯМР в лабораторных условиях и необходимость совершенствования алгоритмов обработки полученных данных для определения пористости и геометрии порового пространства.

1.5 Ультразвуковые методы

Ультразвуковые методы основываются на исследовании характеристик ультразвукового сигнала, прошедшего через образец. Ультразвуковые методы представлены двумя видами, в которых различаются исследуемые характеристики.

Первый вид это методы теневого сканирования. В этих методах излучатель и приемник находятся по разные стороны исследуемого объекта. Таким образом приемник регистрирует так называемую «акустическую тень». Это позволяет наблюдать изменения, возникшие в акустическом сигнале в следствие его распространения через исследуемую внутреннюю структуру. Методы этого вида позволяют определить усредненную плотность и скорость

звука в объекте, наличие и положение неоднородностей относительно плоскости исследования.

Второй вид это эхо-методы. В них излучатель и приемник находятся на одной стороне исследуемого объекта, таким образом приемник регистрирует сигналы, отраженные от границ раздела или неоднородностей – «эхо» внутренней структуры. Эти методы позволяют определять наличие неоднородностей, их положение в объеме объекта (в зависимости от конкретного метода), усредненные скорость звука и плотность, наличие, расположение и форму дефектов и границ раздела.

Ультразвуковые методы применяются и развиваются в различных областях [62-67]. Помимо развития самих методов также ведутся разработки в области улучшения оборудования [68-71].

Для нахождения неоднородностей и их локализации в пространстве широко используются методы обработки эхосигналов во временной области Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) или метод комбинированного SAFT (C-SAFT) [55], которые могут учитывать распространение ультразвука в объекте контроля при многократных переотражениях от его неоднородных границ с учётом явления конверсии мод [56]. В зарубежной литературе метод SAFT и C-SAFT принято называть Total Focusing Method (TFM) [57]. С использованием антенной решётки регистрируются эхосигналы на основе метода двойного сканирования, при котором регистрируются отраженные сигналы как при излучении, так и при приёме всеми парами элементов антенной решётки. В методе рассматривается описание траектории распространения импульса на основе лучевой акустики, от источника до приёмника при отражении от неоднородных границ исследуемого образца с учётом конверсии мод.

Принцип работы методов семейства SAFT можно изложить следующим образом. Пусть проведены измерения эхосигналов, либо при сканировании одноэлементным преобразователем, либо антенной решёткой, которая работает в режиме двойного сканирования. Для того, чтобы оценить

изображение отражателя для заданной акустической схемы, нужно рассчитать время пробега импульса от излучателя до точки I, принадлежащей области восстановления изображения (ОВИ), и до приёмника. Для расчёта можно воспользоваться вариационным принципом Ферма [58]. В соответствии с задержками из измеренных эхосигналов извлекаются и суммируются их значения для всех амплитуд. Если точка I совпадает с реальным положением отражателя, то все эхосигналы будут складываться в фазе и значение суммарной амплитуды будет большим, что и будет служить указанием на наличие несплошности. При удалении точки I от места расположения отражателя амплитуда эхосигнала будет уменьшаться, и их сложение будет происходить не в фазе, что приведёт к падению значения суммарной амплитуды. Перебирая все точки I, принадлежащие ОВИ, можно восстановить изображение отражателей методом C-SAFT. Когда сканирование происходит одноэлементным пьезоэлектрическим преобразователем, принято говорить о применении метода SAFT. Однако принципиальной разницы между двумя методами нет.

Дополнительное перемещение антенной решетки вдоль поверхности образца позволяет получить изображение неоднородностей с большей разрешающей способностью, путем сложения частичных изображений суммарной амплитуды, определенных для каждого положения решетки. Режим записи отраженных сигналов с перемещением антенной решетки при двойном сканировании называется режимом тройного сканирования. Метод сокращенно обозначается TS-C-SAFT. В работе [56] рассмотрен метод M-C-SAFT, описывающей анализ изображений по набору акустических схем. Анализ изображения по нескольким акустическим схемам без учета конверсии мод и для образцов с плоскопараллельным расположением границ рассмотрен в статье [59].

В статье [56] показано, что при использовании метода M-C-SAFT наиболее качественные результаты получаются при сложении модулей частичных изображений, полученных при помощи разных акустических схем.

Такой подход при использовании метода тройного сканирования называется TS-M-C-SAFT.

Один из недостатков изображения неоднородностей, определенного методом SAFT, при использовании одноэлементных преобразователей на продольной волне заключается в возникновении дополнительных переотражений значительной амплитуды, обусловленных распространением поперечной волны и эффектами дифракции, а также искажении сигнала, возникающем в результате отражения от поверхностей непараллельных плоскости сканирования. Использование метода двойного сканирования позволяет уменьшить амплитуды таких переотражений, причем снижение их амплитуды увеличивается с увеличением поперечных размеров антенной решетки [60]. В режиме тройного сканирования разрешающая способность изображения определяется не размерами решетки, а количеством шагов измерения. В случае, когда расстояние между элементами антенной решетки значительно больше длины волны решетку называют прореженной антенной решеткой [61]. Прореженная антенная решетка изготавливается по технологиям, применяемым для обычных преобразователей. Процесс определения координат с определенной точностью называется калибровкой прореженной антенной решетки и рассмотрен в статье [61].

Основным достоинством SAFT методов является возможность получить трехмерное пространственное распределение дефектов их размеры и формы.

Главным недостатком акустических методов является слабая различимость неоднородностей в поперечном сканировании сечении, что частично решается SAFT методами. Но сами методы семейства SAFT требуют множественных измерений для исключения ошибок, при этом сильно подвержены возникновению паразитных сигналов. Также недостатком является связь чувствительности ультразвуковых методов с максимальной глубиной исследования, что особенно ярко выражено в эхо-методах.

Все вышеперечисленные способы определения внутренней структуры применяют различные методы моделирования [72-75]. Большинство таких

методов основано на методе конечных элементов, что требует огромных вычислительных мощностей, растущих в геометрической прогрессии с ростом размеров модели и точности моделирования [76-82].

1.6 Постановка задач исследования.

На основе анализа материалов данной главы было определено, что необходима разработка алгоритмов обработки сигналов, позволяющих конкретизировать зависимость изменений формы и спектра зондирующего сигнала от внутренней структуры исследуемого образца горных пород в режиме проходящих волн, а также применение методов моделирования, требующих меньших вычислительных мощностей, чем методы, основанные на методе конечных элементов.

В соответствии с приведенной выше целью диссертационного исследования были сформулированы следующие задачи:

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.

Выводы

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.

Глава 2. Теоретические основы моделирования распространения акустических волн с учетом эффектов дифракции, дисперсии фазовой скорости и частотнозависимого затухания

2.1 ABCD матрицы в акустике. Введение, акустические элементы и примеры

Рассмотрим распространение акустического луча через некую среду. Предположим, что луч распространяется преимущественно под малым углом к оси z в плоскости, содержащей эту ось (рис. 2.1). Следовательно луч можно описать при помощи двух параметров: r - радиального смещения луча и α - угла отклонения относительно оси. Далее выделим конечную область, ограниченную двумя вертикальными плоскостями, внутри этой среды (рис. 2.1). Тогда состояния луча, входящего в область и выходящего из области опишем при помощи $r_{\text{вх}}$ $\alpha_{\text{вх}}$ и $r_{\text{вых}}$ $\alpha_{\text{вых}}$ соответственно.

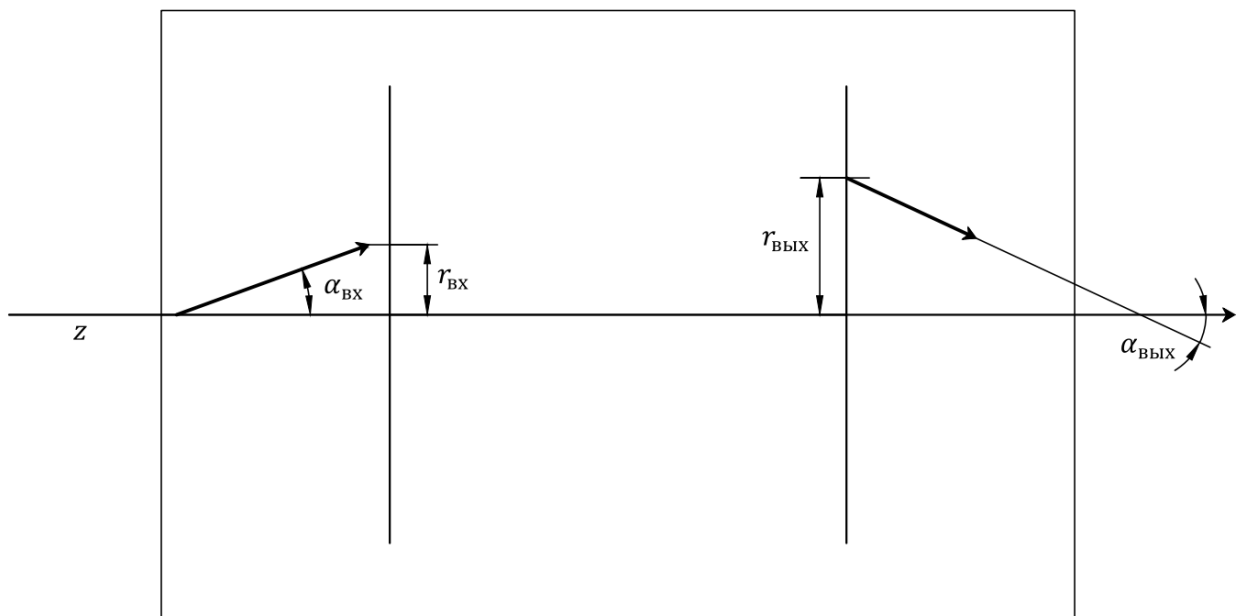


Рисунок 2.1 - Изображение распространения луча через некоторую конечную область в среде

Используем параксиальное приближение, в котором предполагается, что угловые отклонения α достаточно малы, чтобы выполнялось соотношение $\sin \alpha \cong \tan \alpha \cong \alpha$. В этом случае параметры на выходе и параметры на входе связаны некоторым линейным преобразованием:

$$r_{\text{вых}} = A \cdot r_{\text{вх}} + B \cdot \alpha_{\text{вх}}, \quad (2.1)$$

$$\alpha_{\text{вых}} = C \cdot r_{\text{вх}} + D \cdot \alpha_{\text{вх}}, \quad (2.2)$$

где A , B , C и D – константы, характерные для выделенной области. Следовательно соотношения (2.1, 2.2) можно записать в матричном виде:

$$\begin{vmatrix} r_{\text{вых}} \\ \alpha_{\text{вых}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} r_{\text{вх}} \\ \alpha_{\text{вх}} \end{vmatrix}, \quad (2.3)$$

где ABCD-матрица, или лучевая матрица, которая полностью характеризует выделенную конечную область. Назовем такую область акустическим элементом.

В качестве первого примера рассмотрим распространение луча на расстояние $\Delta z = L$ в однородной среде (рис. 2.2). Если плоскости входа и выхода расположены ровно на границах среды, то при применении законов Снеллиуса в параксиальном приближении

$$r_{\text{вых}} = r_{\text{вх}} + L \cdot \alpha_{\text{вх}}, \quad (2.4)$$

$$\alpha_{\text{вых}} = \alpha_{\text{вх}}, \quad (2.5)$$

Следовательно, соответствующая ABCD-матрица имеет вид:

$$\begin{vmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (2.6)$$

В качестве следующего примера рассмотрим прохождение луча через границу раздела сред с различными скоростями распространения звука $c_{\text{вх}}$ и $c_{\text{вых}}$ (рис. 2.3). Очевидно, что в данном случае:

$$r_{\text{вых}} = r_{\text{вх}}, \quad (2.7)$$

Второе же соотношение имеет вид:

$$\alpha_{\text{вых}} = \frac{c_{\text{вых}}}{c_{\text{вх}}} \cdot \alpha_{\text{вх}}, \quad (2.8)$$

где $\frac{c_{\text{ВЫХ}}}{c_{\text{ВХ}}}$ – в соответствии с законом Снеллиуса показатель преломления звука.

В соответствии с (2.7, 2.8) ABCD-матрица равна:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{c_{\text{ВЫХ}}}{c_{\text{ВХ}}} \end{vmatrix}, \quad (2.9)$$

В качестве третьего примера рассмотрим отражение луча от границы раздела сред (рис. 2.4). Единственное, что меняется в этом случае это направление распространения относительно оси z и, следовательно, верны соотношения:

$$r_{\text{ВЫХ}} = r_{\text{ВХ}}, \quad (2.10)$$

$$\alpha_{\text{ВЫХ}} = \alpha_{\text{ВХ}}, \quad (2.11)$$

Соответствующая ABCD-матрица имеет вид:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (2.12)$$

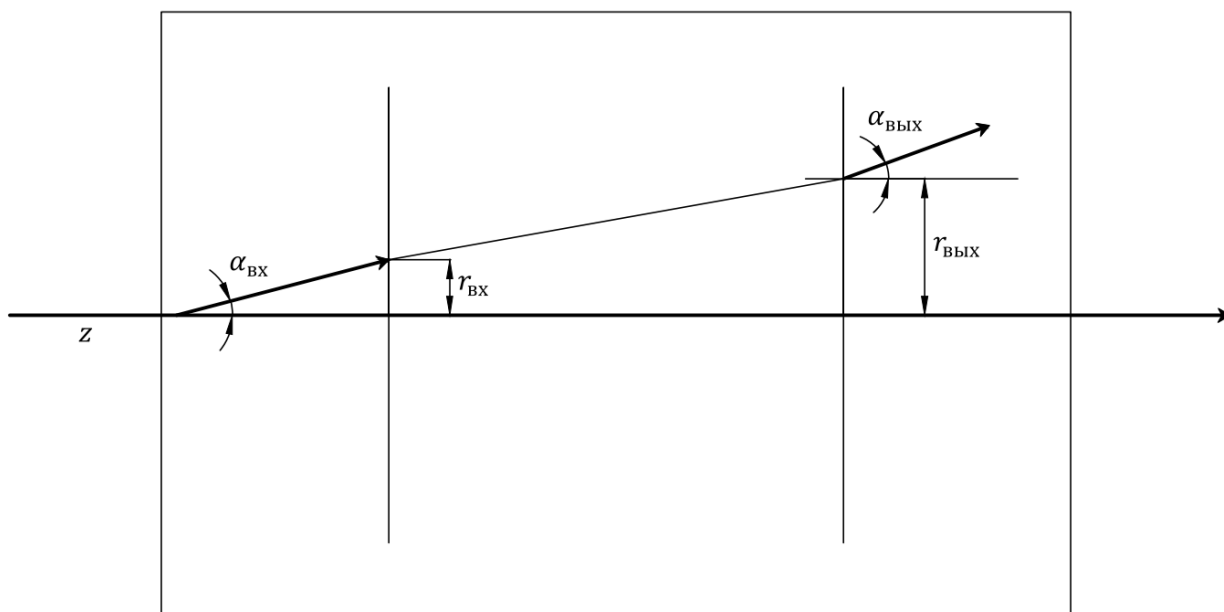


Рисунок 2.2 - Прохождение акустического луча через однородную среду

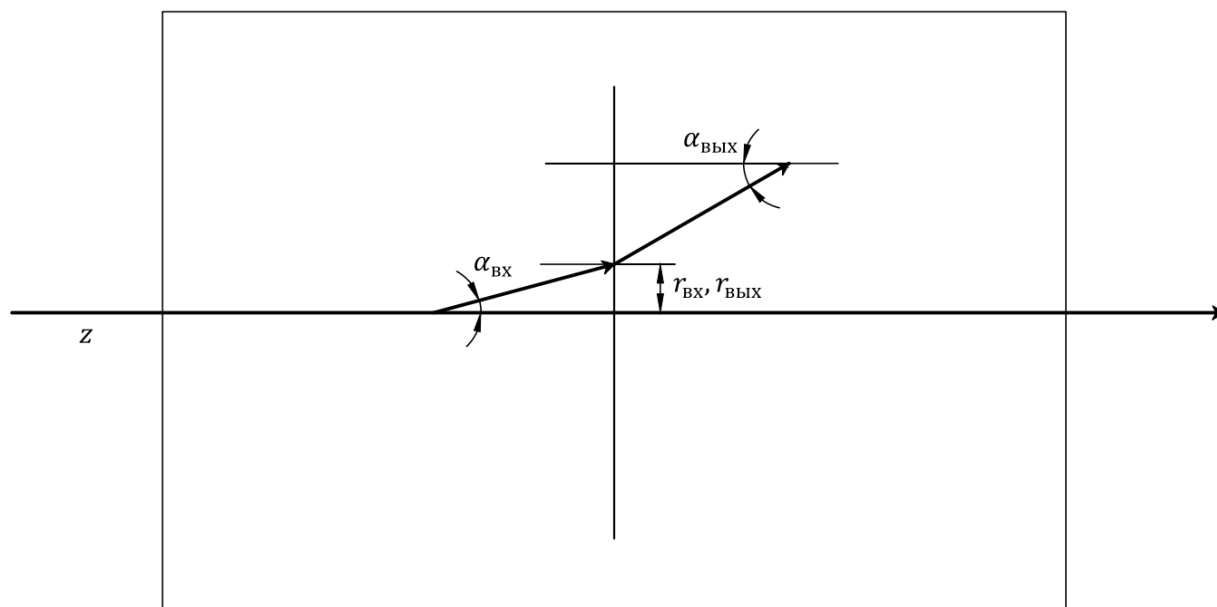


Рисунок 2.3 - Преломление акустического луча на границе раздела сред

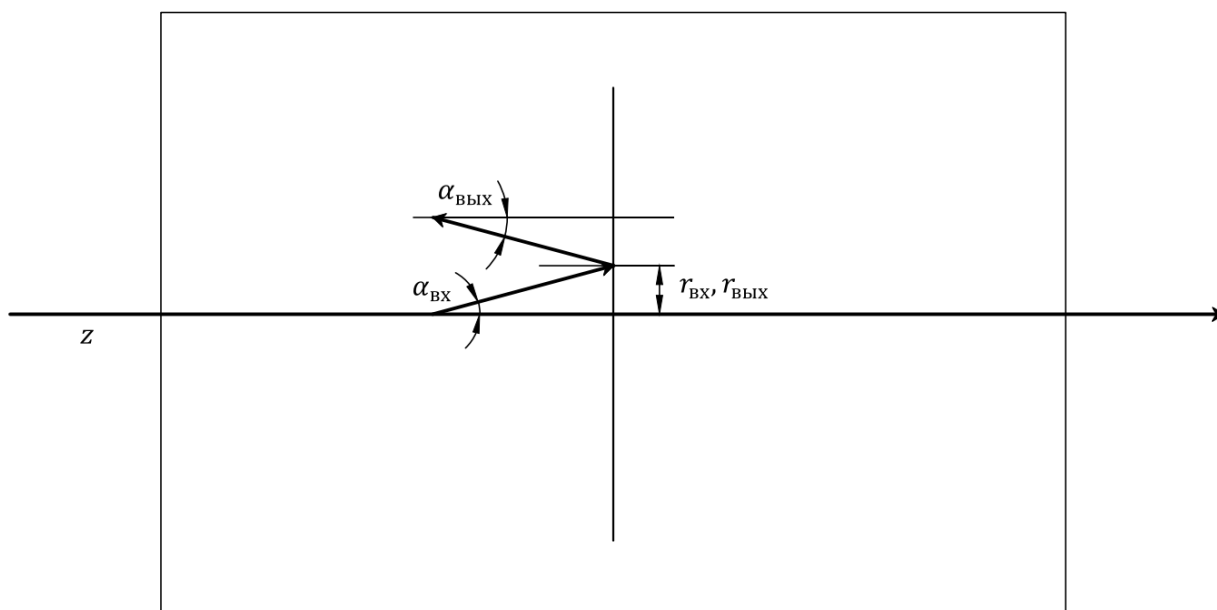


Рисунок 2.4 - Отражение акустического луча от границы раздела сред

2.2 Базовые и сложные акустические элементы.

Рассмотренные выше примеры описывают распространение акустического луча через базовые акустические элементы. Поскольку матрицы для этих элементов известны, любой более сложный акустический элемент можно представить как суперпозицию базовых и рассчитать матрицу для него. Предположим, что внутри сложного элемента можно выбрать такую плоскость O по оси Z , что:

$$\begin{vmatrix} r_o \\ \alpha_o \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} r_{BX} \\ \alpha_{BX} \end{vmatrix}, \quad (2.13)$$

$$\begin{vmatrix} r_{BIX} \\ \alpha_{BIX} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} r_o \\ \alpha_o \end{vmatrix}. \quad (2.14)$$

Тогда очевидно, что:

$$\begin{vmatrix} r_{BIX} \\ \alpha_{BIX} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} r_{BX} \\ \alpha_{BX} \end{vmatrix}. \quad (2.15)$$

Следовательно, перемножением компонент ABCD матриц составных элементов можно получить полную ABCD матрицу, причем порядок перемножения обратен порядку следования элементов.

В качестве примера рассмотрим распространение луча через однородную среду на расстояние L_1 , а затем на расстояние L_2 через ту же среду. Согласно 2.6 и 2.15 можно записать:

$$\begin{vmatrix} r_{BIX} \\ \alpha_{BIX} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} r_{BX} \\ \alpha_{BX} \end{vmatrix}. \quad (2.16)$$

Перемножив соответствующие матрицы, получим:

$$\begin{vmatrix} r_{BIX} \\ \alpha_{BIX} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & L_1 + L_2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} r_{BX} \\ \alpha_{BX} \end{vmatrix}. \quad (2.17)$$

Данный расчет подтверждает, что результирующее распространение луча идентично его распространению в однородной среде на расстояние $L = L_1 + L_2$.

2.3 Учет дифракции на примере генерации акустического импульса и его распространения в оптико-акустическом преобразователе на основе ABCD матриц

Рассмотрим процессы, происходящие в оптико-акустическом генераторе. Пусть из прозрачной среды по нормали к границе в точке $z = 0$ с поглощающей средой 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:

$$\begin{cases} f(t) = \pi^{-1/2} \exp[-(t/\tau_L)^2] \\ \tilde{f}(\omega) = \tau_L \exp[-\omega^2 \tau_L^2 / 4] \end{cases}, \quad (2.18)$$

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 $(10^3 - 10^4) \text{ см}^{-1}$. В этом случае ширина оптического пучка a значительно больше, чем глубина α^{-1} проникновения света в среду генератора, и в таком случае возможно применение метода 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:

$$\begin{cases} c_L^{-2} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} - \Delta \vec{v} = -\beta \left(1 - 4 \frac{c_T^2}{3c_L^2} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial t \partial z}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \chi \Delta T + \frac{\alpha I_0}{\rho c_p} f(t) H(\vec{r}_\perp) e^{-\alpha z} \end{cases}, \quad (2.19)$$

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.

Данную систему уравнений необходимо дополнить граничными условиями на границе раздела $z = 0$, обеспечивающими непрерывность смещений и нормальных компонент скоростей [84]. Тогда 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, вторая – в генераторе. Каждая гармоника ω данных волн описывается выражением:

$$\widetilde{v}_{1,2} = K_{1,2}(\omega) I_0 \tilde{f}(\omega) \exp(i\omega(t \pm z/c_L)), \quad (2.20)$$

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 лазерного воздействия $L_T = \sqrt{\chi \tau_0}$ значительно меньше, чем глубина его проникновения α^{-1} , определяются выражениями:

$$\begin{aligned} K_1(\omega) &= \frac{\beta^*}{\rho_0 c_p} \frac{N}{N+1} \frac{1 + i\omega/\omega_a}{1 + (\omega/\omega_a)^2} \\ K_2(\omega) &= \frac{\beta^*}{\rho_0 c_p} \frac{1}{N+1} \frac{1 - iN\omega/\omega_a}{1 + (\omega/\omega_a)^2} \end{aligned} \quad (2.21)$$

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 в методе поэтапного подхода 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 [87]

$$H(\vec{r}_\perp) = \exp\left(-\frac{\vec{r}_\perp^2}{a^2}\right). \quad (2.22)$$

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

$$\tilde{v}(\omega, \vec{r}_\perp, z) = \frac{K(\omega)I_0\tilde{f}(\omega)}{1+iZ/L_{DF}} \exp\left[-\frac{r_\perp^2}{a^2(1+iZ/L_{DF})}\right], \quad (2.23)$$

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

Для учета дифракции в многослойной среде выражение (2.23) 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:

$$\begin{cases} r_2 = 1 \cdot r_0 + L_1 \cdot \alpha_0 \\ \alpha_2 = 0 \cdot r_0 + \frac{c_2}{c_1} \cdot \alpha_0 \end{cases}, \quad (2.24)$$

где r_0 и α_0 радиальное смещение и угол отклонения волны сразу после возбуждения в материале генератора, а в системе (2.24) учтены преобразования, возникшие как при прохождении слоя 1, так и при прохождении границы раздела 1-2.

Тогда, в соответствии с введенным выше определением ABCD матриц, выражения (2.24) можно представить в матричном виде:

$$\begin{vmatrix} r_2 \\ \alpha_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & \frac{c_2}{c_1} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} r_0 \\ \alpha_0 \end{vmatrix}. \quad (2.25)$$

Также, если рассматривать оптико-акустический генератор как сложный акустический элемент, получим, что рассматриваемая среда состоит из пяти базовых 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 комплексного акустического элемента 1-3 имеет вид:

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & L_3 + \frac{c_3}{c_2}L_2 + \frac{c_3}{c_1}L_1 \\ 0 & \frac{c_3}{c_1} \end{vmatrix}. \quad (2.26)$$

Таким же образом рассчитываются ABCD-матрицы для переотраженных компонент волны. Возвращаясь к рассматриваемому примеру, заметим, что формула (2.23) 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:

$$\tilde{v}(\omega, \vec{r}_\perp, z) = \frac{K(\omega)I_0\tilde{f}(\omega)}{A+B/q_1} \exp\left[-ik \frac{r_\perp^2}{2q_0}\right], \quad (2.27)$$

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 следующим образом [83]:

$$q_1 = \frac{Aq_0+B}{Cq_0+D}, \quad (2.28)$$

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

$$q_0 = \frac{i\omega a^2}{2c_1}. \quad (2.29)$$

Коэффициент отражения по колебательной скорости плоской продольной волны, падающей перпендикулярно к границам раздела сред 1 и 2 из среды 1, можно записать так:

$$R_v = \frac{v_{1,отр}}{v_1} = \left(1 - \frac{Z_1}{Z_2}\right) / \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right). \quad (2.30)$$

где $Z_1 = \rho_1 c_1$, $Z_2 = \rho_2 c_2$ – акустические импедансы генератора (слой 1) и исследуемого объекта (слой 2).

Коэффициент прохождения по колебательной скорости плоской продольной волны, падающей перпендикулярно к границам раздела сред, запишется следующим образом:

$$T_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{2}{(1 + Z_1/Z_2)}. \quad (2.31)$$

Соответственно для трех сред:

$$T_v = T_{v,2 \rightarrow 3} \cdot T_{v,1 \rightarrow 2} = \frac{4}{\left(1 + \frac{Z_3}{Z_2}\right)\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right)}, \quad (2.32)$$

где Z_3 – акустический импеданс приемника (слой 3).

Подставляя это выражение в (2.23), получаем формулу:

$$\tilde{v}(\omega, \vec{r}_\perp, z) = \frac{K(\omega) I_0 \tilde{f}(\omega) \frac{4}{\left(1 + \frac{Z_3}{Z_2}\right)\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right)}}{1 + \left(L_3 + \frac{c_3}{c_2} L_2 + \frac{c_3}{c_1} L_1\right) \frac{2ic_1}{\omega a^2}} \exp \left[-\frac{r_\perp^2}{a^2} \frac{\frac{c_3}{c_1}}{1 + \left(L_3 + \frac{c_3}{c_2} L_2 + \frac{c_3}{c_1} L_1\right) \frac{2ic_1}{\omega a^2}} \right], \quad (2.33)$$

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

$$\tilde{v}(\omega, z) = \frac{\frac{\beta^*}{\rho_1 c_p} \frac{-i\omega/\omega_a}{1 + (\omega/\omega_a)^2} \frac{AEp}{\pi a^2} \exp \left[-\frac{\omega^2 \tau_L^2}{4} \right] \frac{4}{\left(1 + \frac{Z_3}{Z_2}\right)\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right)}}{1 + \left(L_3 + \frac{c_3}{c_2} L_2 + \frac{c_3}{c_1} L_1\right) \frac{2ic_1}{\omega a^2}}, \quad (2.34)$$

Следовательно, использование ABCD матриц не только позволяет учесть эффект дифракции, но и значительно упростить расчет его влияния [87-90].

2.4 Влияние дисперсии фазовой скорости и частотнозависимого затухания при распространении акустической волны. Характерные преобразования волны в процессе распространения

Выше было рассмотрено распространение волны с учетом эффектов дифракции при помощи ABCD матриц, однако такой подход не позволяет учесть частотные зависимости фазовой скорости и коэффициента затухания, их следует учесть отдельно. Для этого рассмотрим распространение отдельной гармоники волны через слоистую среду для выделения каждого преобразования, происходящего в процессе распространения. Предположим, что среда состоит из двух слоёв 1 и 2, а амплитуда каждой гармоники $f(\omega)_0$ на момент начала распространения известна. Тогда трансформация амплитуды после прохождения через слой 1 толщиной l описывается выражением:

$$f(\omega)_1 = f(\omega)_0 \cdot e^{-i \cdot k(\omega) \cdot l}, \quad (2.35)$$

где $k(\omega)$ – частотнозависимое волновое число в слое 1.

Частотнозависимое волновое число $k(\omega)$ определяется двумя составляющими: затуханием и дисперсией фазовой скорости. Согласно экспериментальным данным, затухание в среде можно связать с частотой зависимостью:

$$\alpha = \alpha_0 \omega^y, \quad (2.36)$$

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.

Поскольку частотные зависимости затухания и дисперсии связаны уравнениями Крамерса-Кронига [85, 86], частотную зависимость скорости звука можно представить как:

$$\frac{1}{c(\omega_2)} - \frac{1}{c(\omega_1)} = \alpha_0 \tan\left(\frac{\pi y}{2}\right) (\omega_2^{y-1} - \omega_1^{y-1}), \quad (2.37)$$

где $c(\omega_2)$ и $c(\omega_1)$ – скорости на двух разных частотах ω_2 и ω_1 – соответственно.

Тогда зависимость волнового числа $k(\omega)$ от частоты, удовлетворяющая условиям (2.36) и (2.37), может быть представлена в виде:

$$k(\omega) = \frac{\omega}{c(\omega)} + i\alpha_0 |\omega|^y + \alpha_0 \omega |\omega|^{y-1} \tan\left(\frac{\pi y}{2}\right) \quad (2.38)$$

Обозначим преобразование, описываемое формулой (2.35), как P преобразование. 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:

$$N_T = \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2}, \quad (2.39)$$

$$N_R = \frac{\rho_2 \cdot c_2}{\rho_1 \cdot c_1} = \frac{1}{N_T}, \quad (2.40)$$

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

$$f(\omega)_{12} = f(\omega)_1 \cdot \frac{2 \cdot N_T}{N_T + 1}, \quad (2.41)$$

$$f(\omega)_{11} = f(\omega)_1 \cdot \frac{N_R - 1}{N_R + 1}, \quad (2.42)$$

Обозначим T преобразование, описанное формулой (2.41), а R – преобразование, описанное формулой (2.42).

Так, обозначив типы преобразований, перейдем к рассмотрению акустических импульсов. Отметим, что преобразования, описанные формулами (2.35, 2.41, 2.42), верны только в случае распространения гармоники по оси, перпендикулярной границе раздела сред. Следовательно, импульс волны с плоским фронтом может быть представлен в виде:

$$I = \int_0^\infty f(\omega) \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} d\omega. \quad (2.43)$$

а его преобразования P , T , R соответственно:

$$P: I_1 = \int_0^\infty f(\omega)_0 \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \cdot e^{-i \cdot k(\omega) \cdot l} d\omega, \quad (2.44)$$

$$T: I_1 = \int_0^\infty f(\omega)_0 \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \cdot \frac{2 \cdot N_T}{N_T + 1} d\omega, \quad (2.45)$$

$$R: I_1 = \int_0^\infty f(\omega)_0 \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \cdot \frac{N_R - 1}{N_R + 1} d\omega, \quad (2.46)$$

2.5 Преобразования акустического сигнала с учетом эффектов дифракции, дисперсии фазовой скорости и частотнозависимого затухания

Возвращаясь к анализу распространения волны, рассмотрим не плоскую волну, а волну с гауссовым распределением давления в поперечном сечении. Тогда становится возможным применение метода ABCD-матриц. Гауссов пучок в данном случае характеризуется комплексным параметром $q(\omega)$, начальное значение которого $q(\omega)_0$, и ABCD матрицей M_0 . Таким образом преобразования (2.44 – 2.46) следует дополнить коэффициентом, описывающим преобразование $q(\omega)$:

$$c(q, M) = \frac{q(\omega)}{A \cdot q(\omega) + B}, \quad (2.47)$$

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

Следовательно, преобразования для импульса можно представить в виде:

$$P: \begin{cases} I_1 = \int_0^\infty f(\omega)_0 \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \cdot e^{-i \cdot k(\omega) \cdot l} \cdot c(q(\omega), M_P) d\omega \\ M_P = M_0 \cdot \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{cases}, \quad (2.48)$$

$$T: \begin{cases} I_1 = \int_0^\infty f(\omega)_0 \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \cdot \frac{2 \cdot N_T}{N_T + 1} \cdot c(q(\omega), M_T) d\omega \\ M_T = M_0 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{c_2}{c_1} \end{pmatrix} \end{cases}, \quad (2.49)$$

$$R: \begin{cases} I_1 = \int_0^\infty f(\omega)_0 \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \cdot \frac{N_R - 1}{N_R + 1} \cdot c(q(\omega), M_R) d\omega \\ M_R = M_0 \end{cases}, \quad (2.50)$$

где M с индексами P, T, R – 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:

$$G = \sum_1^N I_n, \quad (2.51)$$

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 [88,90].

Выводы

В настоящей главе описана разработанная теоретическая модель, которая позволяет разбить неоднородную среду на «квазиоднородные» слои. Причем, в каждом таком слое учитывается дифракция акустического пучка, дисперсия фазовой скорости и частотнозависимый коэффициент затухания, включающий как рассеяние на неоднородностях, так и поглощение энергии продольной волны при распространении.

Глава 3. Алгоритм моделирования распространения акустических сигналов и реализующая его программа для ЭВМ.

3.1 Описание метода моделирования

Процесс создания алгоритма был разделен на три этапа. На первом этапе в процессе моделирования распространения 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. Тогда 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 разобранных 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 указанная среда находится в однородной среде с гораздо более низким акустическим импедансом, из двух импульсов, образующихся в процессе генерации учтем 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 изменения 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 в виде:

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

Далее 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.

Указанные выше теоретические выкладки легли в основу программы для ЭВМ [91], 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.

Листинг программы приведен в приложении А.

В качестве примера работы программы на рисунках 3.1-3.3 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 .

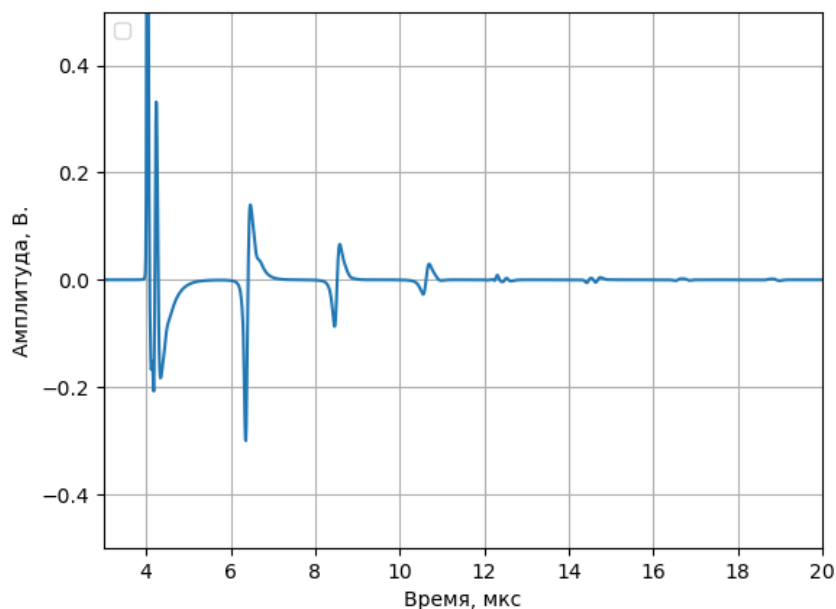


Рисунок 3.1 - Временная форма сигнала, прошедшего через пластину аргиллита

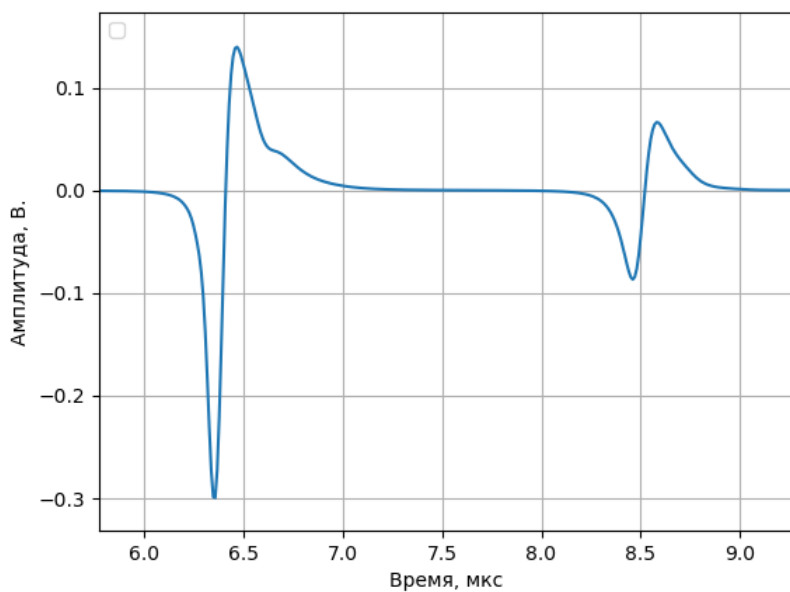


Рисунок 3.2 - Время вступления первого (1) и второго (2) донного сигнала в пластине аргиллита

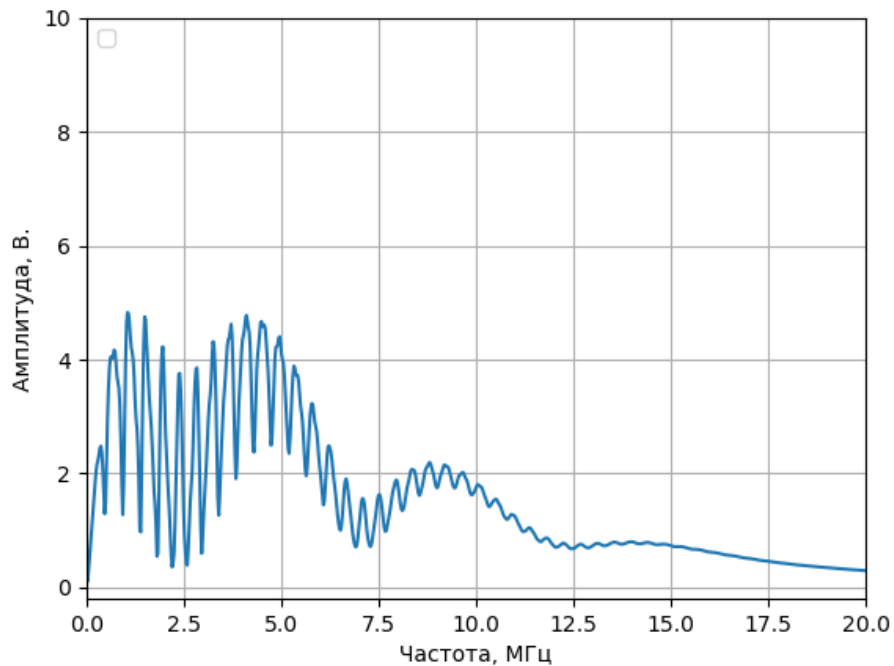


Рисунок 3.3 - Спектр прошедшего через пластину аргиллита сигнала

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 .

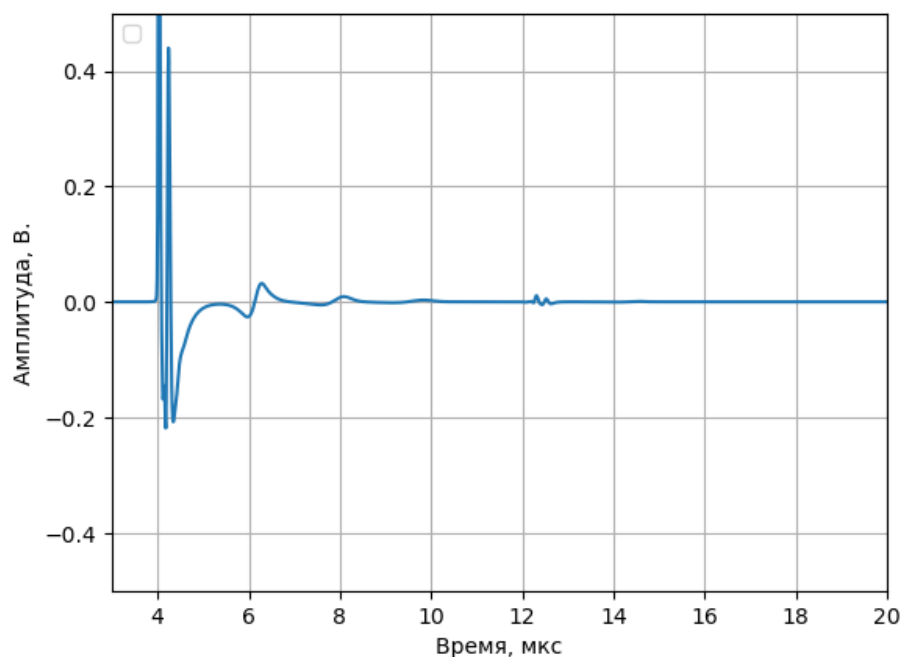


Рисунок 3.4 - Временная форма сигнала, прошедшего через пластину известняка

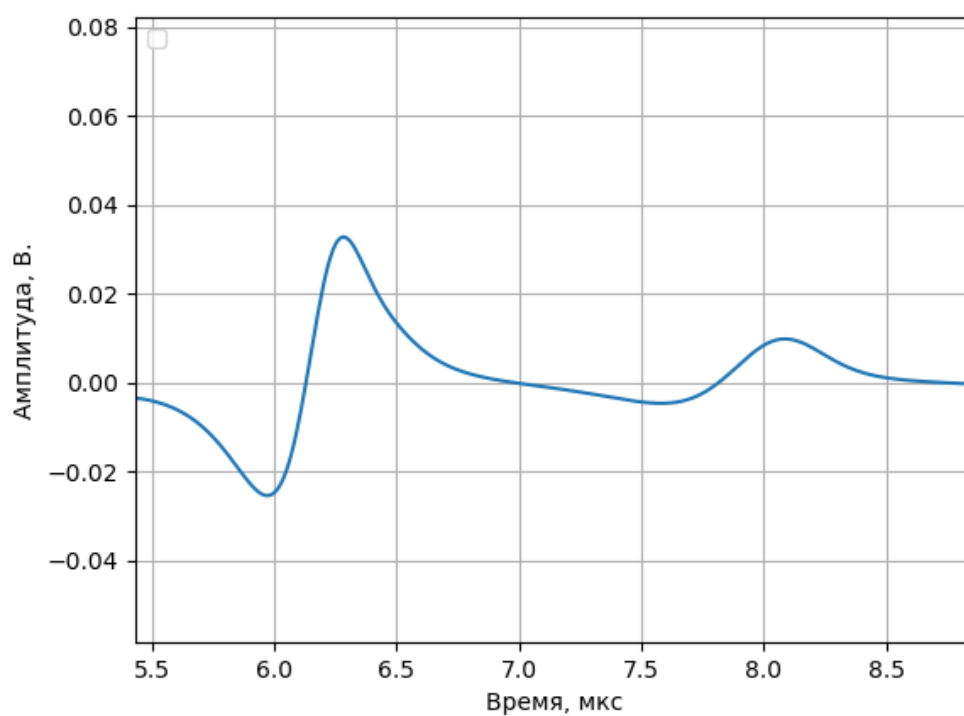


Рисунок 3.5 - Время вступления первого (1) и второго (2) донного сигнала в пластине известняка

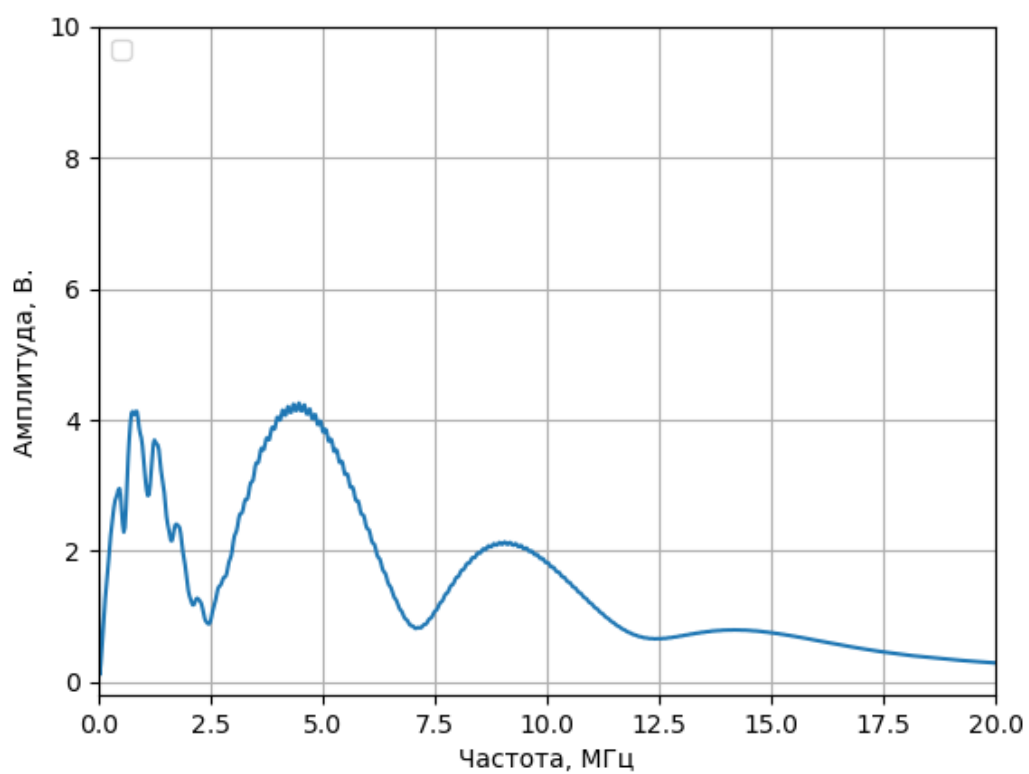


Рисунок 3.6 - Спектр прошедшего через пластину известняка сигнала

3.2 Учет особенностей образца и его контакта с излучателем и приемником

Для решения некоторых малоизученных задач, в программу были введены аппроксимации процессов, происходящих в определенных условиях.

Аппроксимация тонких слоев, в том числе контакта с поверхностью образца через жидкость.

Поскольку жидкость на границе излучатель – образец вносит значительный вклад в результаты исследования, причем, этот вклад зависит от механической обработки границы образца и составляющего его материала – введена аппроксимация данной границы отдельным слоем, состоящим из материала образца/жидкости в некотором весовом соотношении определяющимся в процессе обработки результатов эксперимента.

Аппроксимация неоднородности слоя в поперечном направлении распространения сечения.

В связи с тем, что геометрическая область исследования в сечении поперечном направлению исследования представляет собой пятно с радиусом порядка трех миллиметров, некоторые дефекты попадают в область пятна, но не перекрывают её полностью. Измерение в такой ситуации дает неоднозначный результат, который не может быть воспроизведен при моделировании предложенным методом без введения дополнительных данных. Поскольку изначально каждый слой принимается однородным применяется аппроксимация одного слоя несколькими материалами в весовом соотношении. Такая аппроксимация применяется только после уточнения наличия соответствующей неоднородности замерами в соседних точках.

Аппроксимация пропитывания образца и аппроксимация диффузионного слоя между слоями образца.

В некоторых случаях два слоя настолько тесно связаны между собой, что градиентно переносят акустические свойства на границе раздела. В таких ситуациях возможно как искажение свойств отраженного и прошедшего

сигналов на указанной границе, так и полное отсутствие отраженного сигнала, что делает границу намного менее различимой для акустических методов. Обнаружение такой границы возможно только по изменению частотнозависимых характеристик сигнала. Моделирование предложенным методом подразумевает наличие четких границ раздела сред, следовательно лучшей аппроксимацией этого явления представляется введение множества тонких слоев, плавно меняющих акустические свойства от одного материала к другому. Но, такой подход потребовал бы огромных вычислительных мощностей, поэтому подобные границы аппроксимируются одним (где это приемлемо) или, максимум, тремя слоями. Каждый такой слой обладает усредненными свойствами двух соседних слоев.

3.3 Обоснование принятых программных решений и оценка производительности разработанной программы

Разработка программной реализации алгоритма проводилась на языке Python, в связи с удобством запуска и отладки кода свойственным всем интерпретируемым языкам и наличием доступных для данного конкретного языка библиотек функций, используемых при научных расчетах. Работа описанного выше алгоритма моделирования предполагает динамическое комбинирование функции, описывающей полный сигнал. В программной реализации алгоритма для решения этой задачи изначально был использован модуль символьных расчетов для Python – SymPy. На этом этапе реализация продемонстрировала очень низкую производительность расчетов. Расчет модели при глубине переотражения, равной пяти, для одного слоя выполнялся порядка десяти минут, а для трех слоев занимал уже около трех часов. Такое соотношение точности и глубины моделирования с времязатратами привело бы к нецелесообразности применения алгоритма. Анализ кода показал, что такая длительность расчета связана с работой модуля SymPy. В частности, сами символьные вычисления предполагают анализ и изменение текстовой

строки с дальнейшим её преобразованием в строку кода исходного языка, таким образом добавляя огромное множество дополнительных операций в расчет. В то же время подобное поведение говорит о сходстве реализаций символьных вычислений и интерпретируемых языков.

Рассмотрим различия компилируемых и интерпретируемых языков, а также связь с символьными вычислениями.

Компилируемый язык — это язык, на котором готовая программа содержит инструкции целевой машины. Под готовой в данном случае подразумевается программа, которая была скомпилирована и собрана (assembled).

Интерпретируемый язык — это язык, на котором готовой программой является не сборка инструкций целевой машины, а набор инструкций для специальной программы – интерпретатора. Интерпретатор обычно написан на языке целевой машины – ассемблере, благодаря чему у интерпретируемых языков процессы компиляции и сборки выполняются в момент работы программы, а не до её запуска.

Основным преимуществом компилируемых языков является скорость исполнения. Так как исполняемый файл таких языков представляет собой машинный код, они работают гораздо быстрее и эффективнее, нежели интерпретируемые, в связи с необходимостью дополнительных преобразований исполняемого файла последних.

В связи с тем, что для низкоуровневых языков эффективность работы является важнейшим фактором, почти все они – компилируемые.

Помимо вышеперечисленного компилируемые языки позволяют разработчику лучше контролировать аппаратное обеспечение, управлять памятью и распределением ресурсов процессора.

К компилируемым языкам относятся такие языки как C, C++, Erlang, Haskell, Rust и Go.

Основным недостатком компилируемых языков является необходимость предварительной компиляции кода. Тестирование каждого

изменения в программе требует выполнения процесса компиляции, что значительно усложняет отладку. Помимо этого, машинный код различается для разных устройств, что делает компилируемые языки платформо-зависимыми.

В отличие от компилируемых языков, код интерпретируемых выполняется специальной программой, что добавляет гибкости и удобства в процесс разработки программы.

К интерпретируемым языкам относятся PHP, Perl, Ruby и Python.

Удобство, предоставляемое отсутствием процесса компиляции, достигается за счет снижения скорости исполнения программ, написанных на интерпретируемых языках. До недавних пор время, затрачиваемое на интерпретацию кода, не позволяло создавать интерпретируемые программы, требующие сложных расчетов, сопоставимые по скорости исполнения с компилируемыми программами. На сегодняшний день существуют технологии частичной компиляции, позволяющие перевести наиболее сложные инструкции в машинный код, что значительно ускоряет выполнение таких программ.

Таким образом, если схематично представить преобразования кода от написанного программистом до исполняемого машиной, то получатся цепочки преобразований.

Для компилируемых языков:

Исходный код -> Код ассемблера, посредством компиляции -> Машинный код после сборки.

Для интерпретируемых языков:

Исходный код -> Машинный код при помощи программы интерпретатора в процессе выполнения.

Учитывая, что преобразование от исходного кода до машинного требует одинаковых вычислительных мощностей, получаем, что в случае компилируемых языков все преобразования выполнены до начала исполнения и затраченные на это вычислительные мощности больше не требуются. В

случае интерпретируемых языков все преобразования выполняются в процессе исполнения и требуют дополнительных вычислительных мощностей.

Исходя из приведенной выше информации естественным решением проблемы с производительностью является переход от интерпретируемого языка к компилируемому, так как модули символьных вычислений существуют в обоих случаях. Но, если учесть реализацию символьных вычислений, то получится, что к типичной цепочке преобразования кода добавляется преобразование из символьного представления в исполняемый машинный код. В случае интерпретируемого языка это простое преобразование, а в случае компилируемого символьный модуль представляет собой интерпретатор, что приводит к уравниванию производительности компилируемых и интерпретируемых языков в случае выполнения символьных вычислений.

Таким образом для увеличения производительности был разработан собственный алгоритм динамического комбинирования функций, основывающийся на свойствах интерпретируемых языков. Поскольку само устройство алгоритма не позволяет предварительное компилирование кода реализация программы осталась на языке Python. На данный момент расчет модели при глубине переотражения, равной пяти, для одного слоя выполняется порядка десяти секунд, а для трех слоев время выполнения не превышает 3 минут.

Дальнейшее увеличение производительности программы возможно путем частичной компиляции статических функций или путем разработки языка программирования, позволяющего совместную работу как с компилируемым, так и с интерпретируемым кодом.

Выводы

В данной главе на основе теоретической модели, разработанной в главе 2, описан созданный алгоритм моделирования и обработки широкополосных ультразвуковых сигналов, прошедших через гетерогенную среду, а также рассеянных и отраженных от ее неоднородностей. Введены аппроксимации для описания процессов распространения акустических сигналов через тонкие слои, слои с поперечными неоднородностями, численное моделирование которых не представляется возможным в связи с недостаточной их изученностью или чрезмерной ресурсозатратностью такого моделирования. Показана необходимость использования интерпретируемого языка программирования для реализации алгоритма и рассмотрены потенциально перспективные направления модернизации реализующего алгоритм кода.

Глава 4. Метод исследования структуры геоматериалов, обоснование его применимости и верификация.

4.1 Описание метода определения внутренней структуры геоматериала

Предлагаемый метод определения внутренней структуры геоматериала основывается на анализе изменений в падающем на неоднородный образец акустическом сигнале в результате прохождения его через исследуемый объект. Для анализа этих изменений используется разложение падающего (исходного\начального) сигнала, который представляет собой одиночный акустический импульс заданной длительности и временной формы, по плоским волнам. 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. В этом случае применение метода минимизации отклонений между двумя сигналами (модельным и экспериментальным) в спектрах или временных формах позволяет определить физико-механические характеристики и строение каждого элемента модели, соответствующего элементу исследуемой среды. Следовательно, совместное использование вышеописанного метода моделирования и метода минимизации отклонений позволяет определить внутреннюю структуру геоматериала, а также расположение, размеры и характер его

неоднородностей, причем погрешности такого исследования обусловлены задаваемой допустимой точностью минимизации отклонений.

4.2 Перечень образцов, исследованных предложенным методом

С целью верификации метода проведены эксперименты на специально синтезированных модельных образцах. Модельные образцы создаются из отполированных пластин различных горных пород, изготовленных из имеющегося кернового материала, в которые вносятся различные неоднородности (отверстия и полости различных форм). Эти пластины соединяются между собой клеем так, чтобы созданная неоднородность находилась во внутренней части получившегося образца. Краткое описание изготовленных образцов приведено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Описание образцов

Маркировка	Количество слоев	Породы, их толщина	Неоднородность	Описание и результаты исследований
<i>AcA</i>	2	Аргиллит, 3.30 мм	Пропил	с. 49
		Аргиллит, 3.40 мм	-	
<i>A1L</i>	2	Аргиллит, 3.95 мм	Отверстие	с. 54
		Известняк, 3.35 мм	-	
<i>AM</i>	2	Аргиллит, 3.10 мм	-	с. 64
		Мрамор, 3.80 мм	-	

Таблица 4.1 - Описание образцов – продолжение

Маркировка	Количество слоев	Породы, их толщина	Неоднородность	Описание и результаты исследований
AQM	3	Аргиллит, 3.70 мм	-	с. 69
		Кварцит, 5.46 мм	-	
		Мрамор, 3.00 мм	-	
AcM	2	Аргиллит, 3.60 мм	Неоднородность Конической формы	с. 73
		Мрамор, 2.90 мм	-	
L1L	2	Известняк, 3.00 мм	Отверстие	с. 84
		Известняк, 2.20 мм	-	

4.3 Экспериментальные исследования предложенным методом на специально подготовленных образцах горных пород и верификация их результатов

В данном разделе представлены результаты исследований на вышеописанных образцах и проведено их сравнение с результатами, полученными другими методами, а также охарактеризованы некоторые аспекты применения метода. Подробное описание экспериментальных исследований проведено для образцов AcA и A1L, для остальных приведены результаты исследований.

4.3.1 Образец “AcA”

Данный образец представляет собой две склеенные между собой пластины аргиллита. На одной из этих пластин выполнен пропил глубиной ~300 мкм (см. рис. 4.5). Пластины склеены так, что пропил находится внутри образца и полностью заполнен клеем.

На рисунках 4.1 и 4.2 приведены графики временной формы для смоделированного и измеренного на изготовленном образце сигнала.

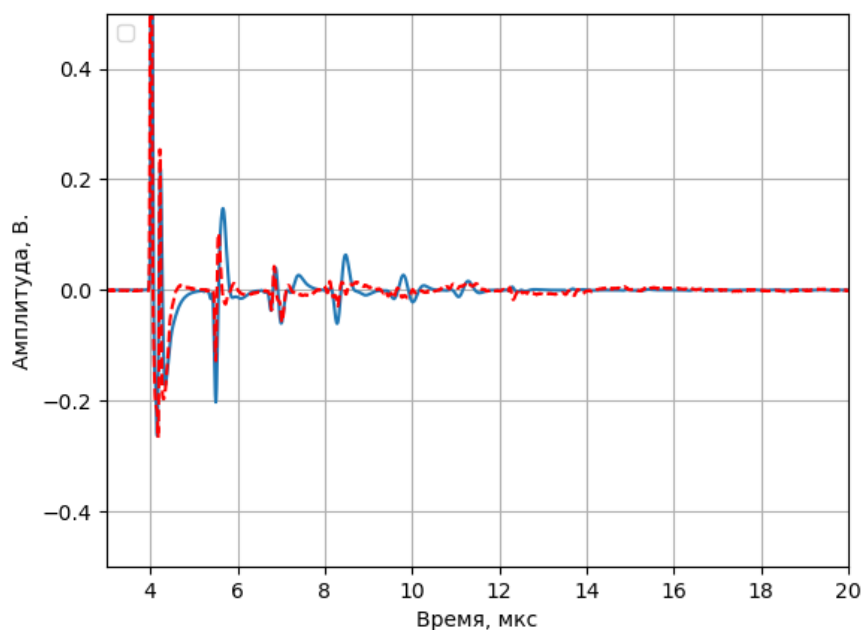


Рисунок 4.1 - Временная форма сигнала сканирования области, в которой отсутствует пропил. Красной линией обозначен сигнал, измеренный на изготовленном образце, синей – смоделированный сигнал

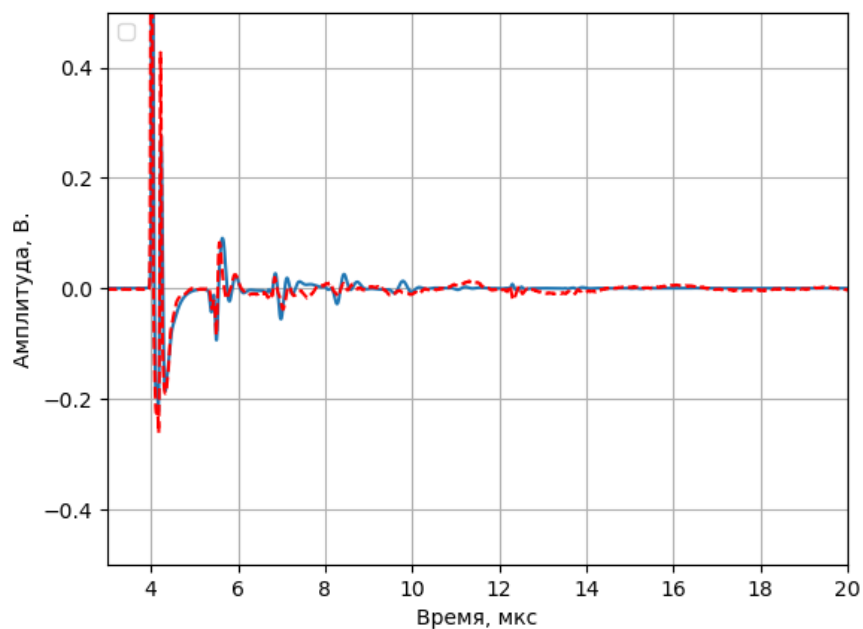


Рисунок 4.2 - Временная форма сигнала сканирования области, в которой присутствует пропил. Красной линией обозначен сигнал, измеренный на изготовленном образце, синей – смоделированный сигнал

На рисунках 4.3 и 4.4 приведены одномерные изображения внутренних структур, определенных по сигналам в областях образца АсА 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 пучка, отсчитываемая от оси пучка.

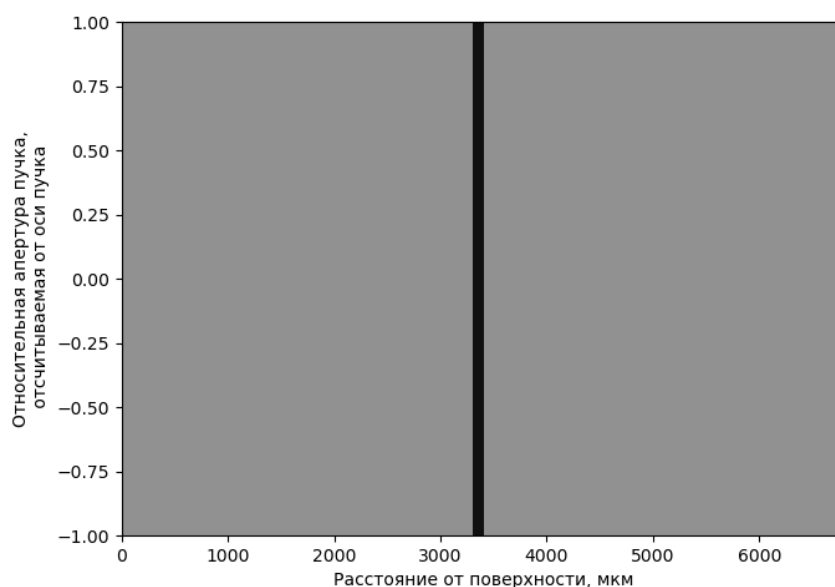


Рисунок 4.3 - Слоистая структура, определенная по сигналу в области без пропила

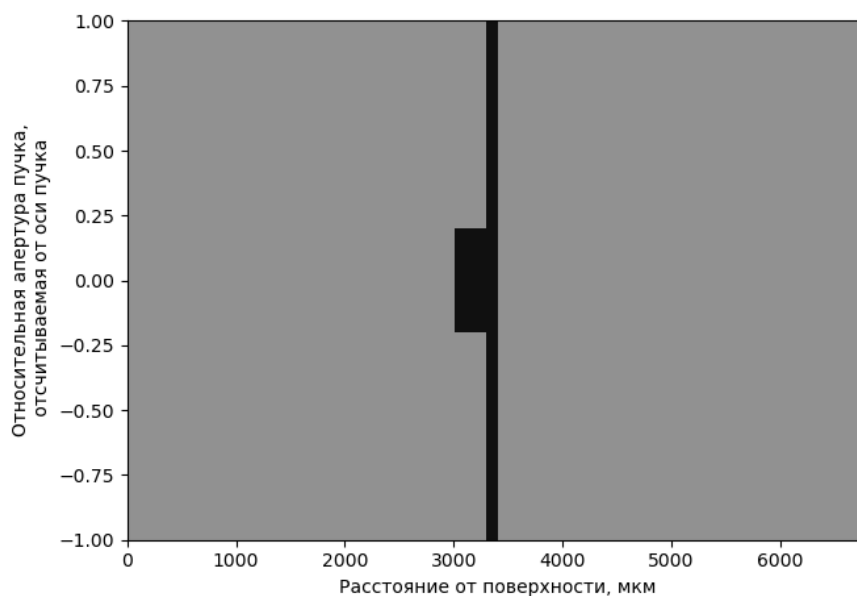


Рисунок 4.4 - Слоистая структура, определенная по сигналу в области, содержащей пропил

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. 4.6. Сравнение численных значений характеристик, полученных в результате применения предлагаемого метода (расчетных) и измеренных традиционными способами, приведено в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Численные значения характеристик образца АсА, полученные в результате применения предлагаемого метода (расчетные) и измеренные традиционными способами (номера в шапке таблицы соответствуют обозначениям рис. 4.5)

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	2115
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

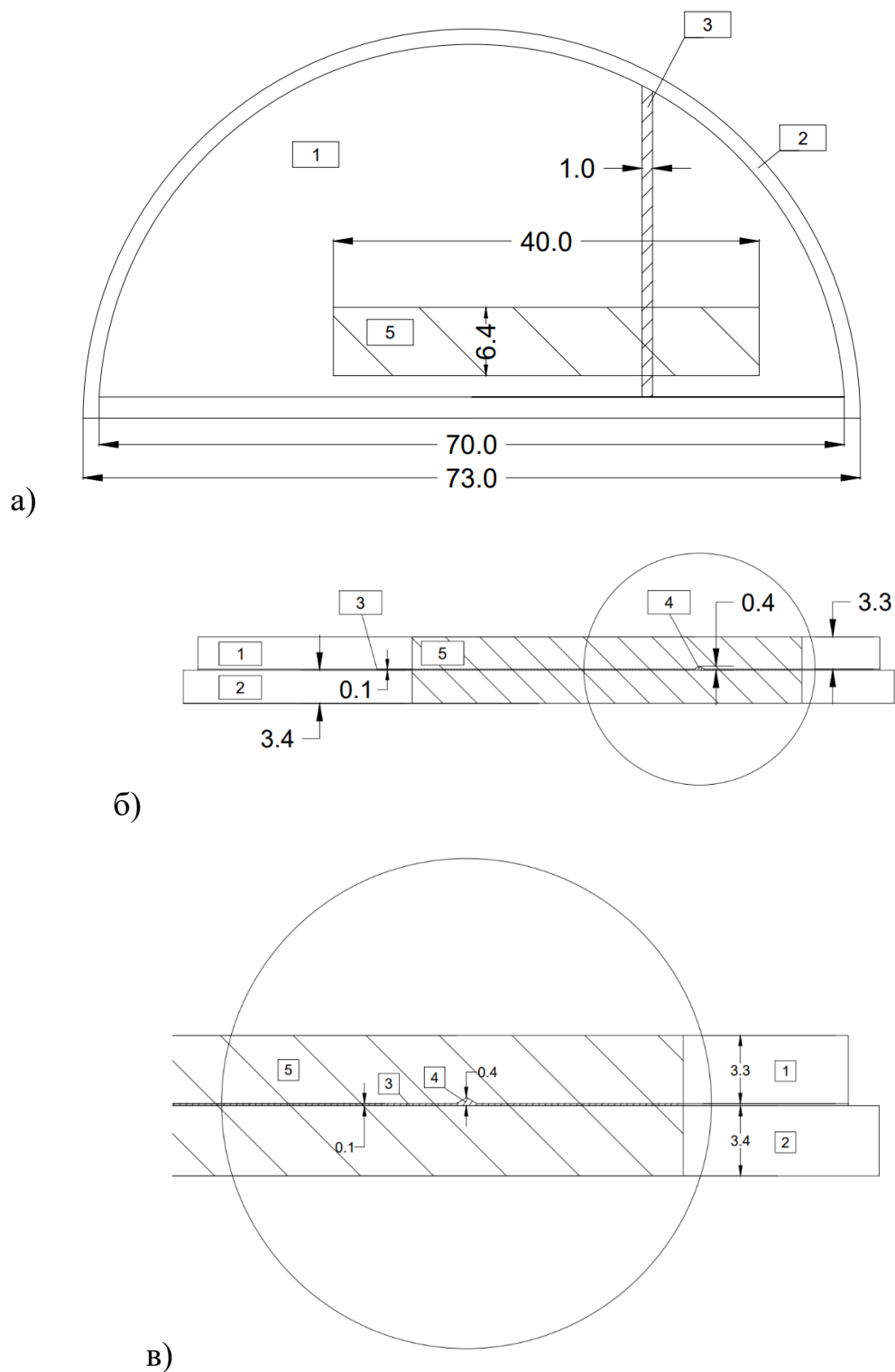


Рисунок 4.5 - Схема образца АсА: **а** - вид сверху; **б** – вид сбоку;
в – увеличенная область пропила. Размеры указаны в мм

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

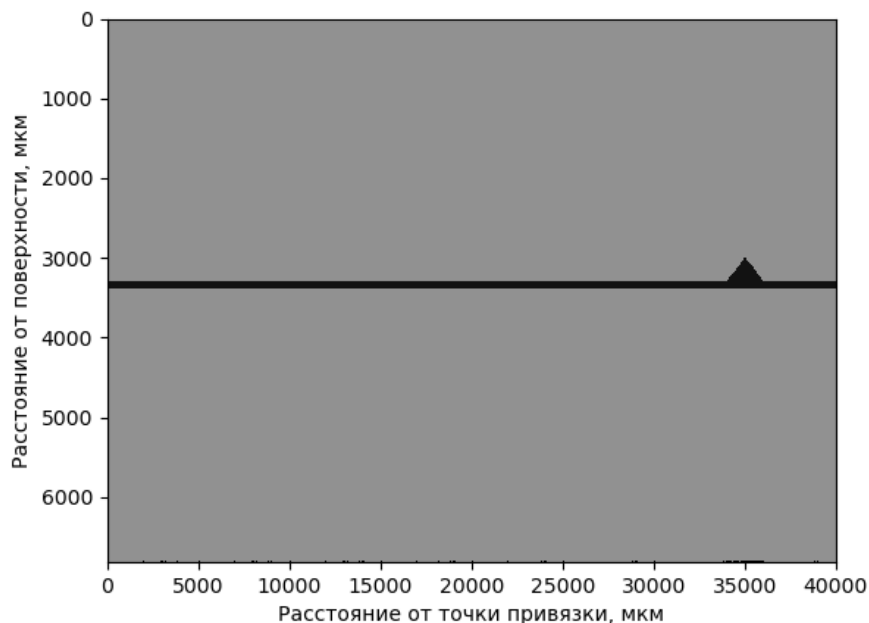


Рисунок 4.6 - Изображение внутренней структуры образца AsA, полученное расшифровкой изменений в прошедшем через него широкополосном акустическом сигнале

4.3.2 Образец “A1L”

Более подробно рассмотрим проводимые операции на примере образца “A1L”, состоящего из пластины аргиллита, склеенной с пластиной известняка. В пластине аргиллита просверлено отверстие диаметром 1 мм, заполненное клеем.

Сканирование образца проведено с каждой из двух сторон для дополнительной сверки результатов. Сигналы, полученные со стороны пластины известняка (далее L) изображены в полном размере совместно на рисунке 4.7. Поскольку визуальный анализ в таком масштабе затруднен, на рисунке 4.8 приведена часть тех же сигналов в уменьшенном диапазоне времен. Из этого рисунка видно, что при смещении вдоль линии сканирования изменяется время вступления сигналов, а на некоторых сигналах заметно отклонение амплитуды от среднего значения. Вышеописанные отклонения связаны с общей неоднородностью известняка. Последовательная обработка

отдельных сигналов дает несколько отличающиеся характеристики, но учитывая допущение, что отдельный рассматриваемый слой должен быть однороден, эти характеристики усредняются. Таким образом, учет неоднородности известняка в расчете потребовал бы введения множества дополнительных слоев и значительно усложнил бы исследование.

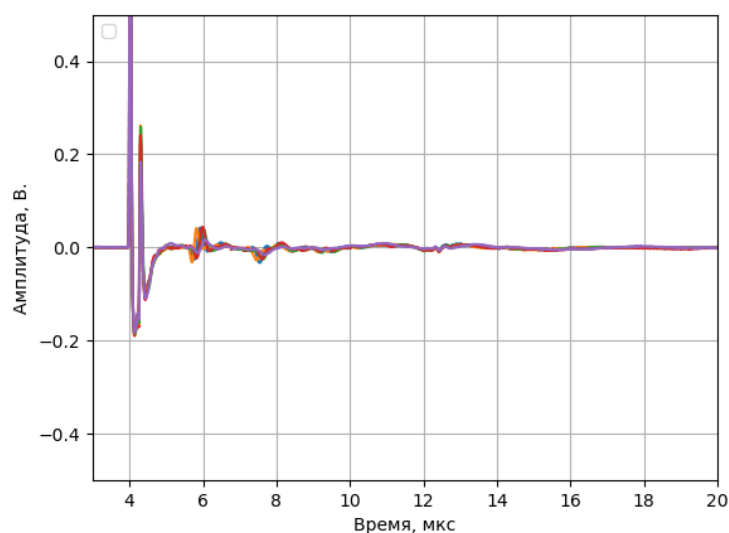


Рисунок 4.7 - Полноразмерное изображение сигналов, измеренных по стороне L. Цветовые обозначения соответствуют приведенным в таблице 4.3

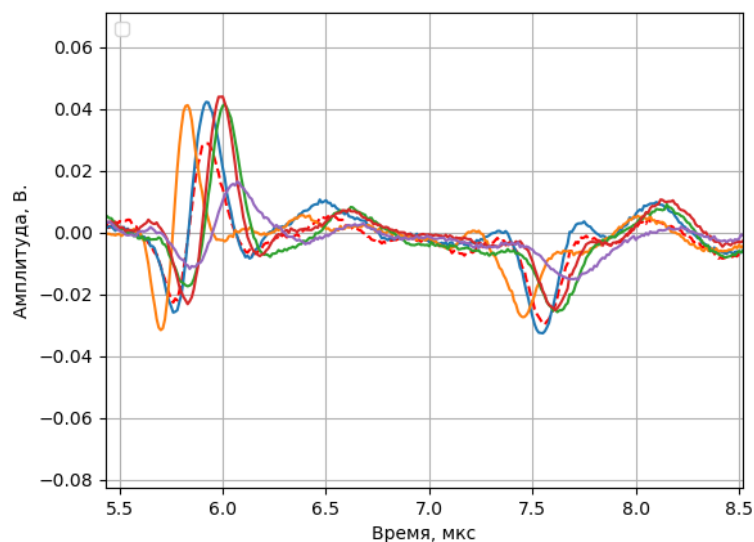


Рисунок 4.8 - Часть изображения сигналов, измеренных по стороне L в уменьшенном диапазоне времен. Цветовые обозначения соответствуют приведенным в таблице 4.3

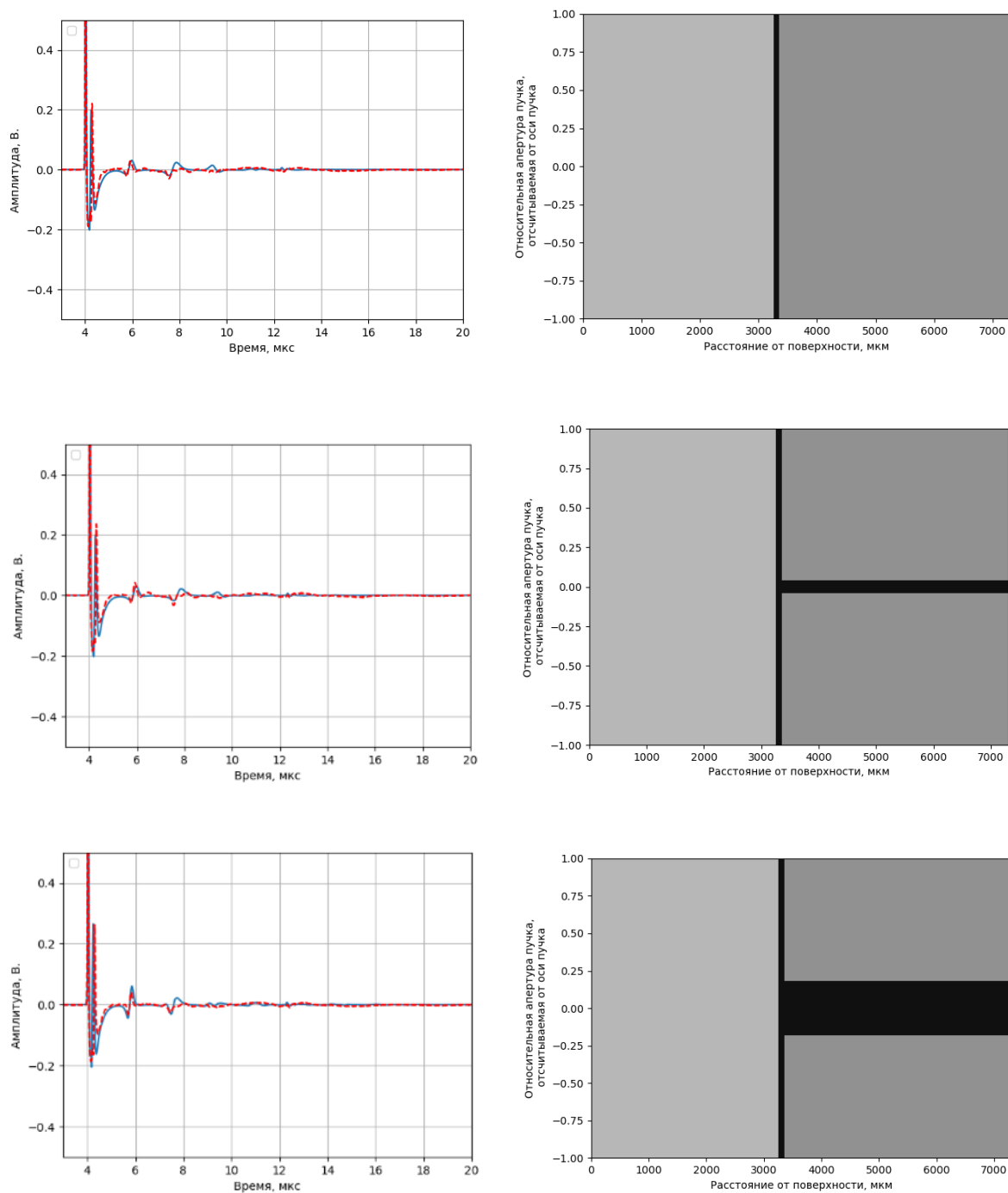


Рисунок 4.9 - Сигналы и соответствующие им слоистые структуры, полученные в результате обработки в программе, расположенные сверху вниз в порядке приближения к зоне с отверстием, по линии сканирования со стороны L, где красным цветом обозначен экспериментальный сигнал, а синим – модельный.

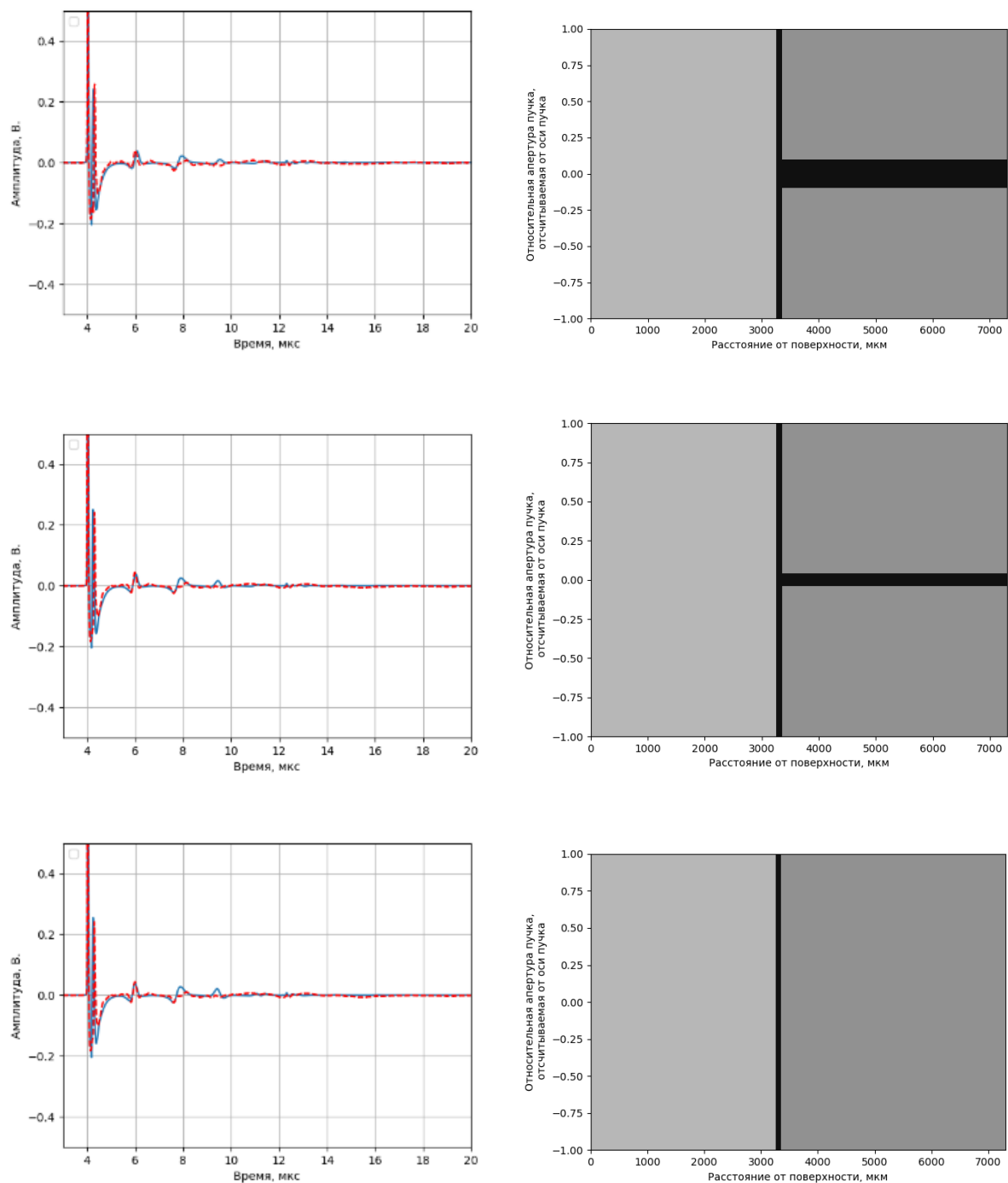


Рисунок 4.10 - Сигналы и соответствующие им слоистые структуры, полученные в результате обработки в программе, расположенные сверху вниз в порядке отдаления от зоны с отверстием по линии сканирования со стороны L, где красным цветом обозначен экспериментальный сигнал, а синим – модельный.

Таблица 4.3 - Цветовые обозначения сигналов

Линия	Описание
Синяя	Модельный сигнал
Красный пунктир	Сигнал, полученный в точке на оси отверстия
Фиолетовая	Сигнал, полученный в точке за 1.5 мм до оси отверстия по линии сканирования
Зеленая	Сигнал, полученный в точке через 1.5 мм после оси отверстия по линии сканирования
Оранжевая	Сигнал, полученный в начальной точке области сканирования
Бордовая	Сигнал, полученный в конечной точке области сканирования

На рисунках 4.9 - 4.10 изображены сигналы, зарегистрированные в процессе сканирования образца по линии, включающей область с отверстием. Изображенные сигналы включают все значимые для дальнейшего анализа области (области сканирования, не включающие отверстие; области, частично включающие отверстие и область, включающая отверстие полностью). На изображения измеренных сигналов нанесены модельные сигналы, а с правой стороны изображены слоистые структуры, характеризующие соответствующие модельные сигналы. Для отображения акустического импеданса использовались усредненные по всем измерениям плотности и скорости звука соответствующих слоев.

Для сравнения полученных результатов таким же образом было проведено сканирование со стороны аргиллита (далее А). Общее полноразмерное изображение сигналов приведено на рисунке 4.11, а часть тех же сигналов в уменьшенном диапазоне времен на рисунке 4.12.

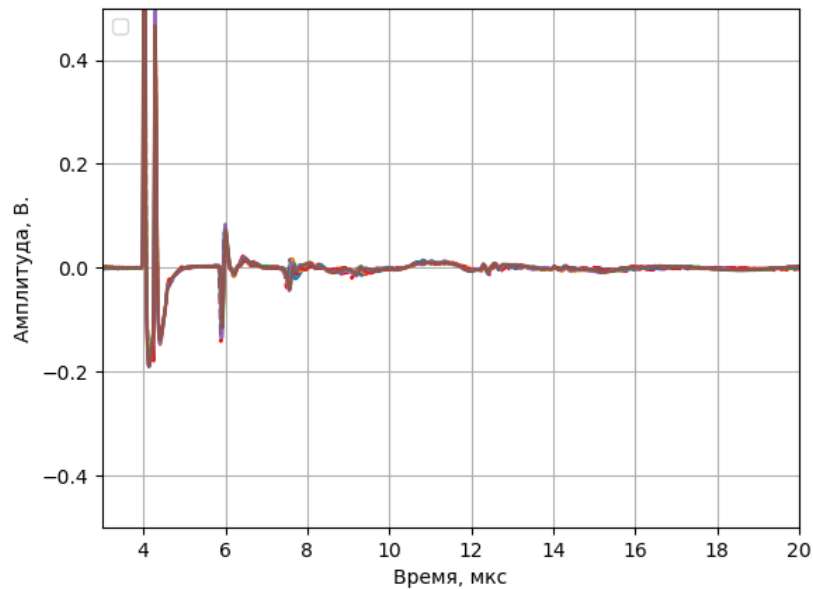


Рисунок 4.11 - Полноразмерное изображение сигналов, измеренных по стороне А. Цветовые обозначения соответствуют приведенным в таблице 4.3

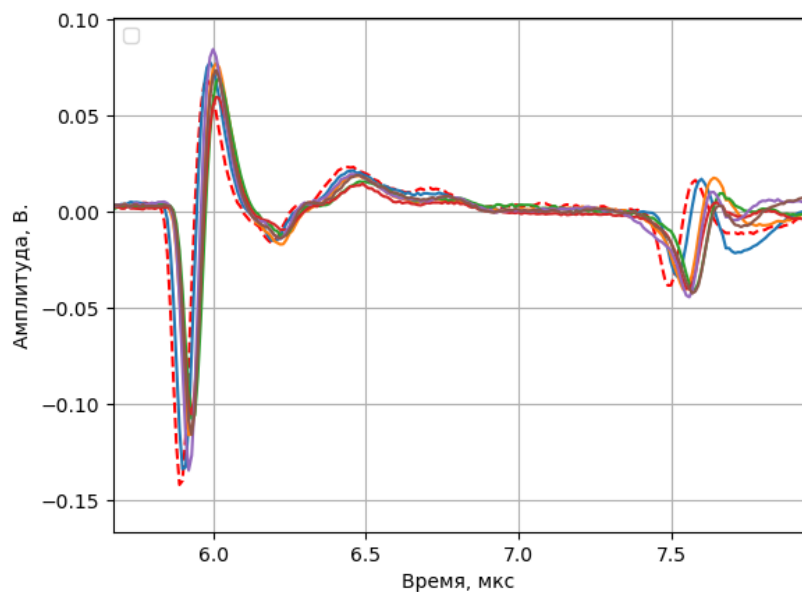


Рисунок 4.12 - часть изображения сигналов, измеренных по стороне А в уменьшенном диапазоне времен. Цветовые обозначения соответствуют приведенным в таблице 4.3

Из рисунка 4.12 видно некоторое различие амплитуд импульсов, как и в случае со стороной L. Но, в связи с тем, что аргиллит обладает гораздо большей однородностью, нежели известняк, указанные изменения в наибольшей степени связаны с наличием отверстия. Также на рисунках 4.13 –

4.14 представлены сигналы, зарегистрированные в процессе сканирования образца по линии, включающей область с отверстием, и соответствующие им слоистые структуры.

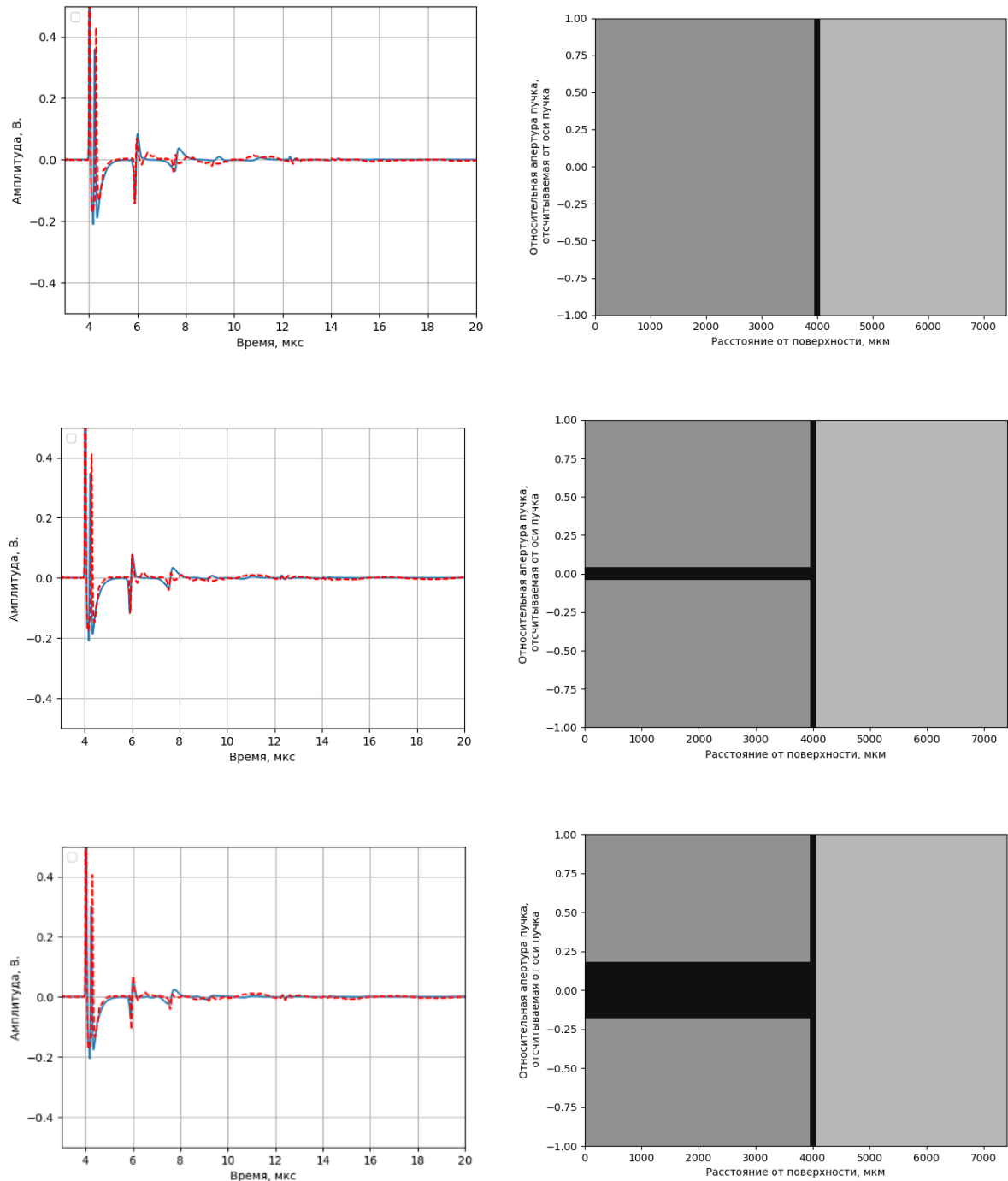


Рисунок 4.13 - Сигналы и соответствующие им слоистые структуры, полученные в результате обработки в программе, расположенные сверху вниз в порядке приближения к зоне с отверстием, по линии сканирования со стороны А, где красным цветом обозначен экспериментальный сигнал, а синим – модельный.

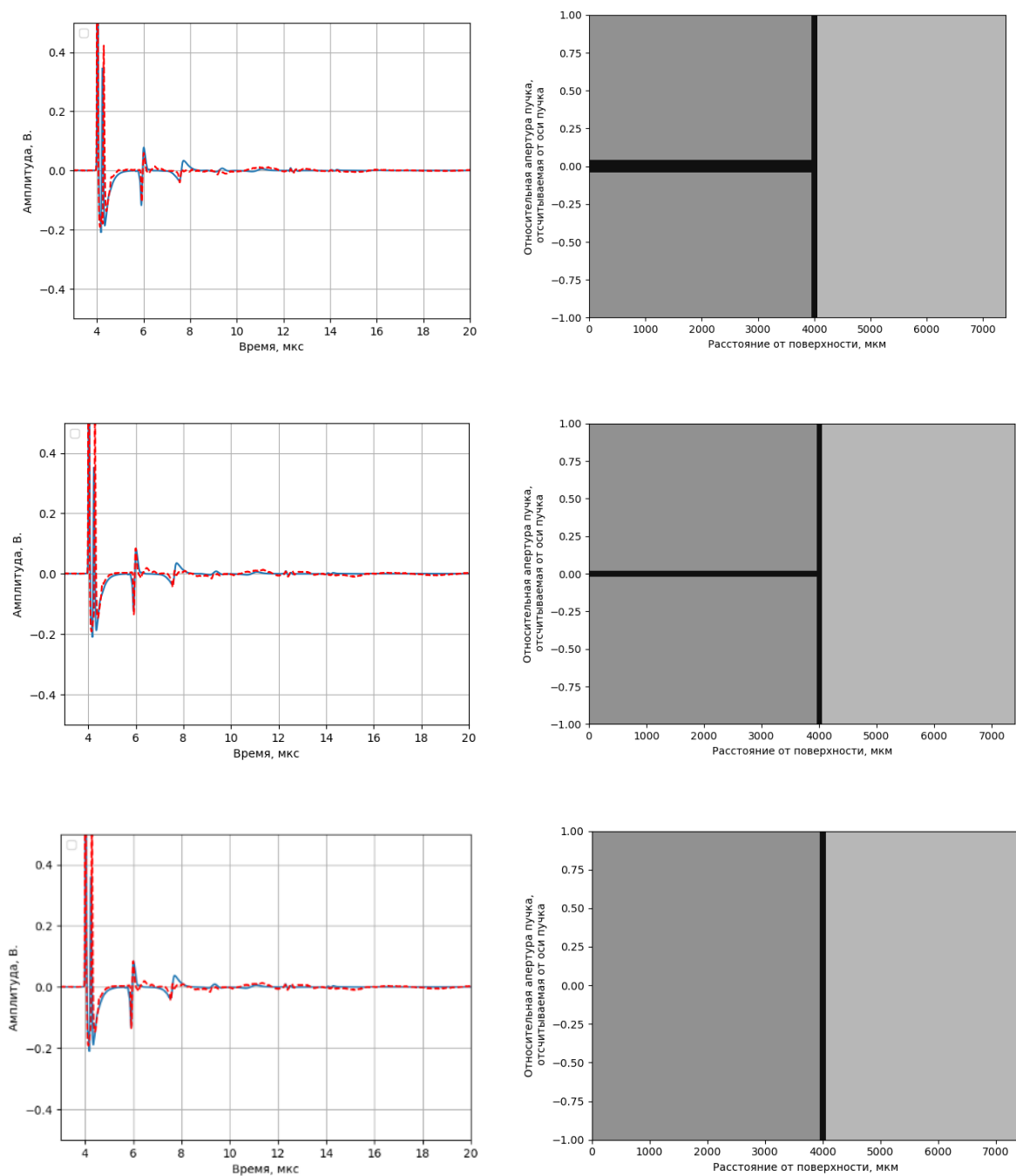


Рисунок 4.14 - Сигналы и соответствующие им слоистые структуры, полученные в результате обработки в программе, расположенные сверху вниз в порядке отдаления от зоны с отверстием, по линии сканирования со стороны А, где красным цветом обозначен экспериментальный сигнал, а синим – модельный.

Полученные изображения слоистой структуры представляют собой почти зеркальное отражение соответствующих изображений, полученных при сканировании стороны L. Их сходство подтверждает корректность проведения исследования, а различия обусловлены несколькими факторами, среди

которых ручное выполнение сканирования, различия поверхностных слоев пород и напытывание известняка клеем. Последний фактор не оказал значительного влияния в данном конкретном случае, но в общем случае подобное явление создает слой, подобный диффузионному по акустическим свойствам, что сильно затрудняет определение границы раздела.

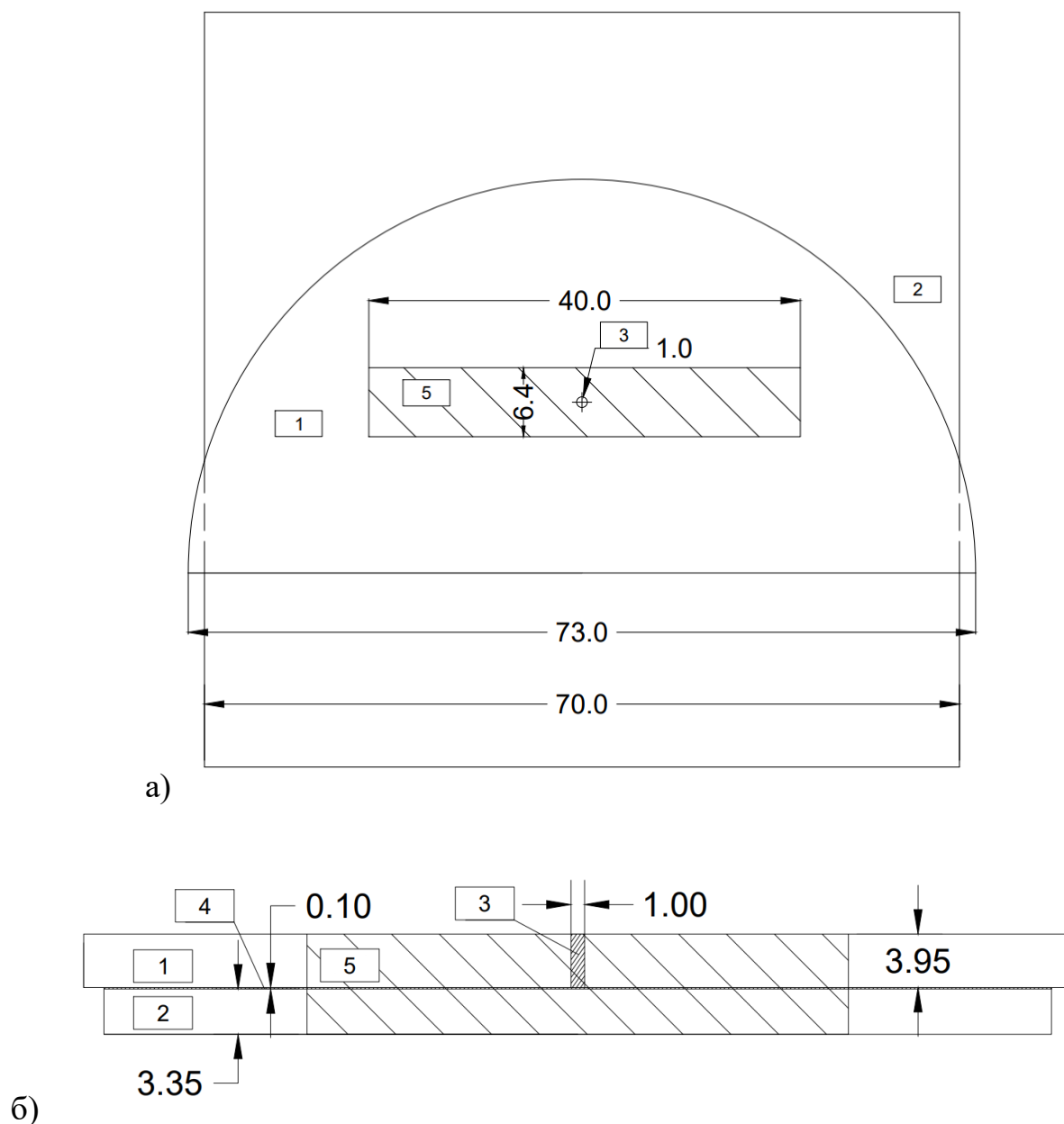


Рисунок 4.15 - Схема образца A1L: **а** - вид сверху; **б** – вид сбоку.

Размеры указаны в мм

1. Пластина аргиллита с неоднородностью
2. Пластина известняка
3. Отверстие
4. Клеевой слой
5. Область сканирования

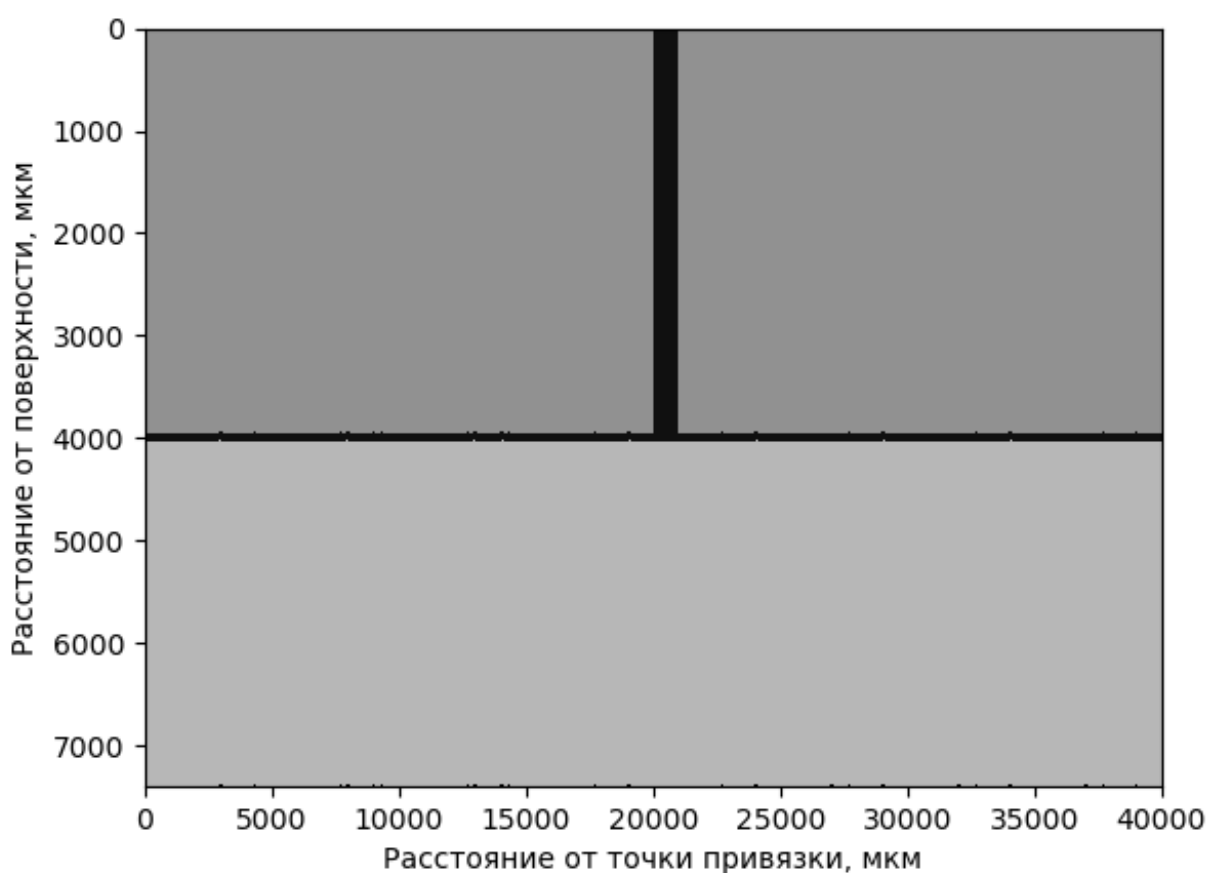


Рисунок 4.16 - Изображение внутренней структуры образца A1L, полученное расшифровкой изменений в прошедшем через него широкополосном акустическом сигнале

Определение изображения внутренней структуры производится с учетом каждого отдельного сигнала, диаметра сечения луча и распределения энергии пучка в поперечном сечении. Путем анализа сшивки сигналов определяется равномерное непрерывное изображение (рис. 4.16). Сравнение численных значений характеристик, полученных в результате применения предлагаемого метода (расчетных) и измеренных традиционными способами, приведено в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Численные значения характеристик образца “А1L”, полученные в результате применения предлагаемого метода (расчетных) и измеренных традиционными способами (номера в шапке таблицы соответствуют обозначениям рис. 4.15)

Характеристика	Аргиллит (1)	Известняк (2)	Отверстие (3)	Клеевой слой (4)	Полный образец
Расчетные значения					
Скорость звука, м/с	4887	4924*	1432	1432	4841*
Плотность, кг/м ³	2275	2883	887	887	-
Толщина, мм	3.95	3.35	3.95	0.10	7.40
Диаметр, мм	-	-	1.00	-	-
Измеренные значения					
Скорость звука, м/с	4932	4986*	-	1452	4912*
Толщина, мм	3.95	3.35	1.00	-	7.40
Диаметр, мм	-	-	1.00	-	-

* Помечены усредненные значения, так как из-за неоднородности известняка в различных точках значения скоростей варьировались.

4.3.3 Образец “АМ”

Образец “АМ” состоит из склеенных между собой пластин аргиллита и мрамора без внедренных дефектов. Обе породы обладают высокой однородностью и скоростью распространения звука, сигнал затухает очень медленно, даже визуально можно определить шесть отражений от границы раздела и два донных импульса. По всей линии сканирования сигнал почти не меняется, причем с обеих сторон сканирования, что сильно упрощает расчет. Сигнал со стороны аргиллита и слоистая структура представлены на рисунках 4.17 и 4.18.

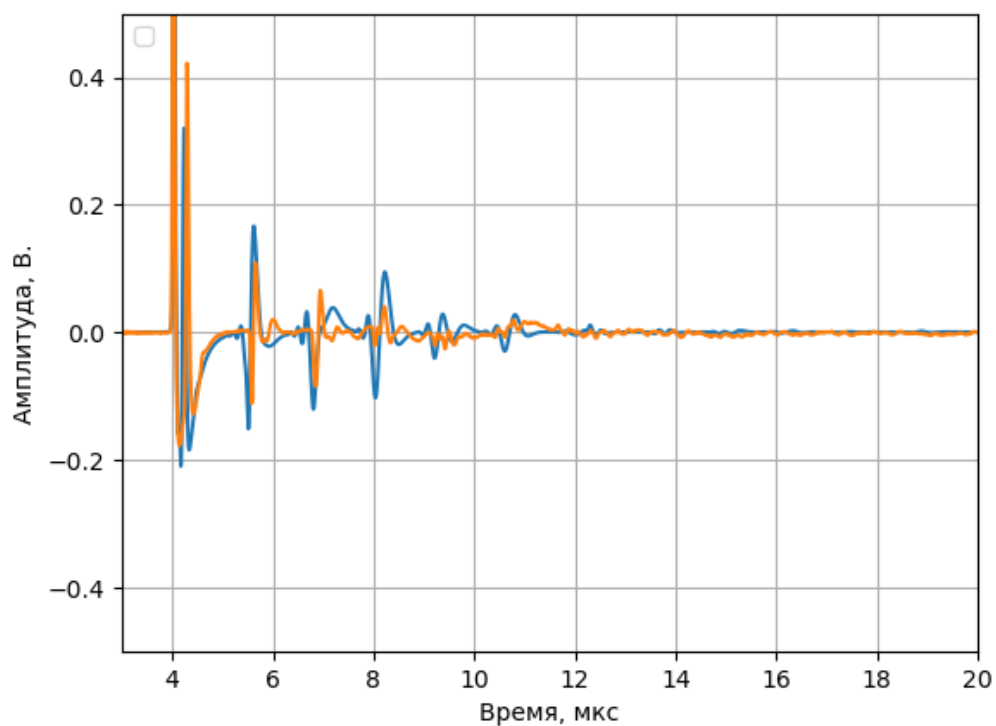


Рисунок 4.17 - Измеренный и модельный сигналы сканирования со стороны аргиллита, оранжевым и синим цветом соответственно

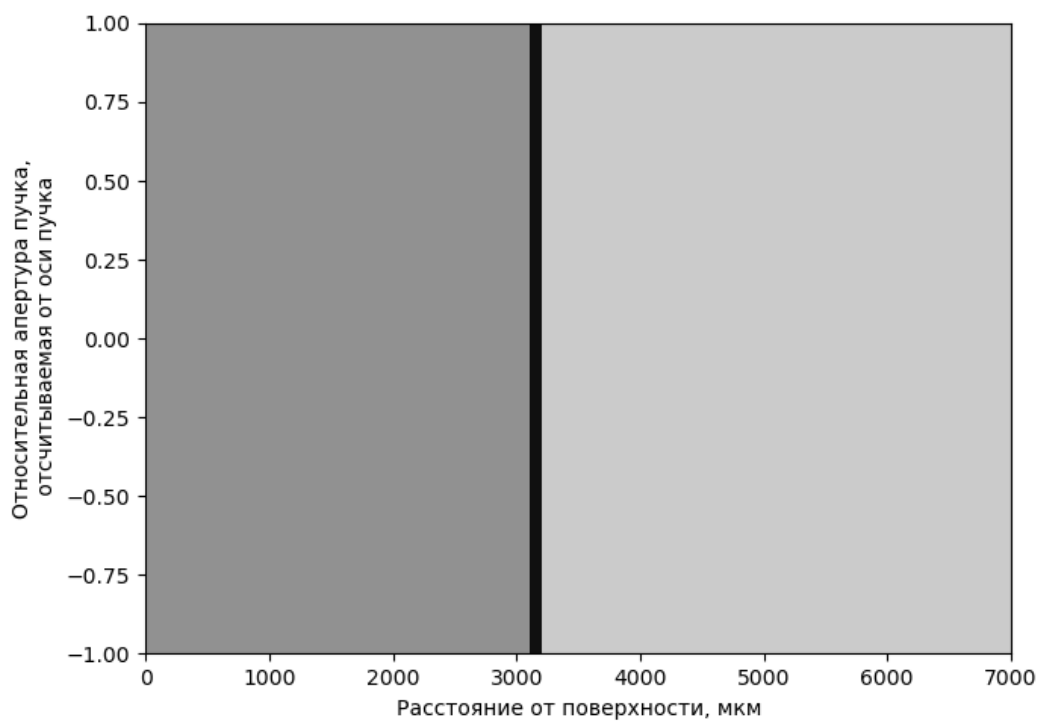


Рисунок 4.18 - Слоистая структура, определенная со стороны аргиллита

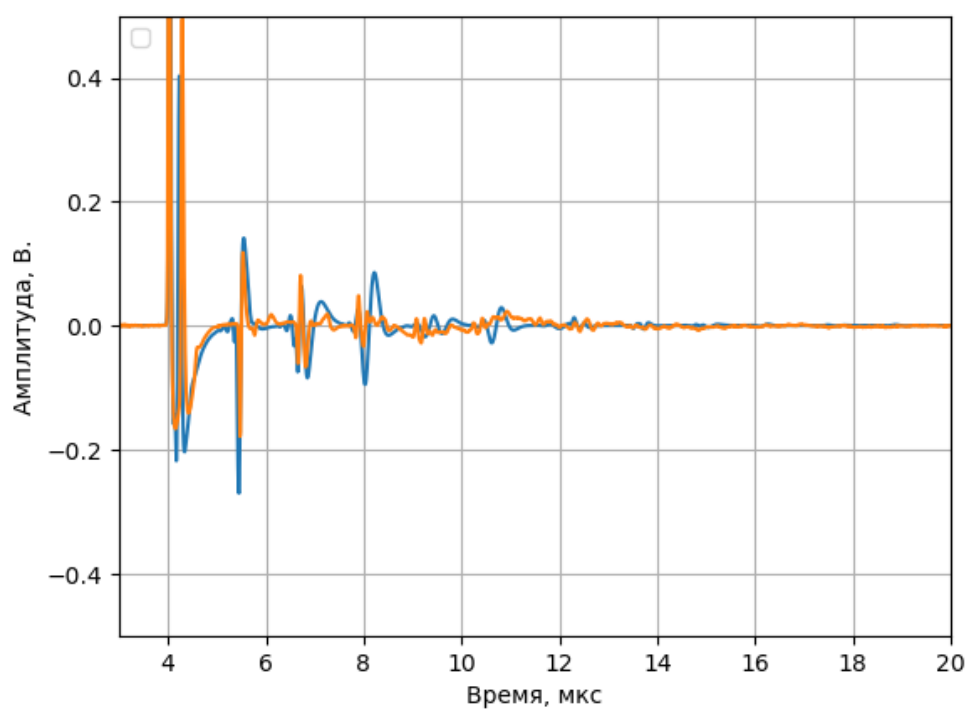


Рисунок 4.19 - Измеренный и модельный сигналы сканирования со стороны мрамора, оранжевым и синим цветом соответственно.

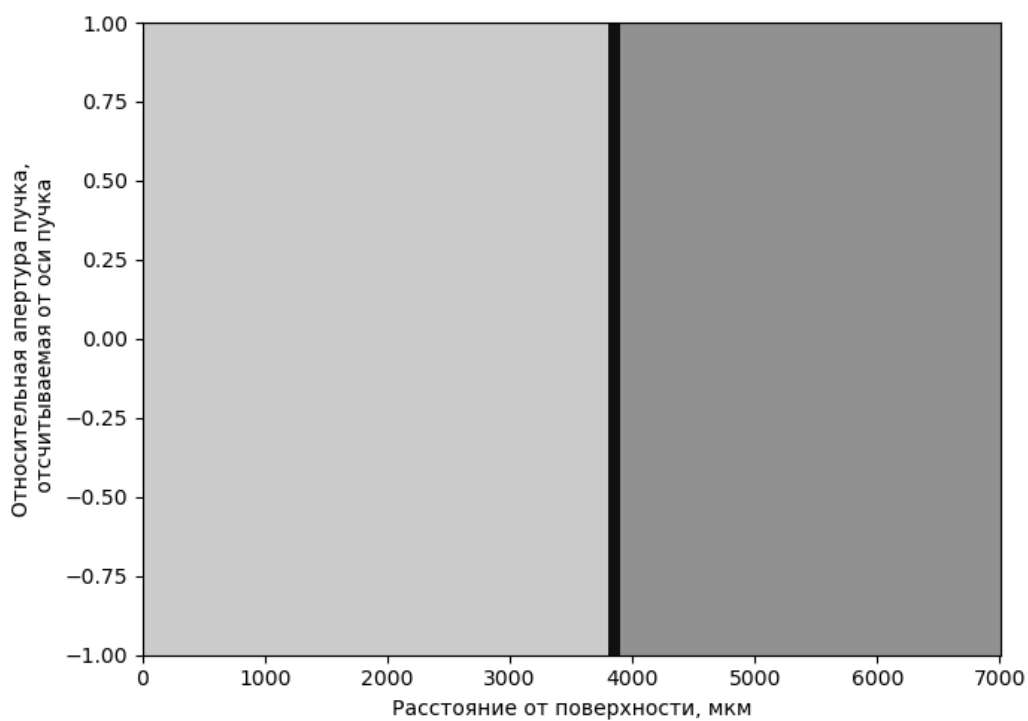


Рисунок 4.20 - Слоистая структура, определенная со стороны мрамора.

На рисунке 4.17 можно наблюдать значительные расхождения модельного сигнала с третьего вступления граничного сигнала, это связано с тем, что приведенные испытания были проведены с параметром глубины переотражения, останавливающим моделирование распространения сигнала после регистрации второго вступления, поэтому сложения донного и переотраженного граничного сигналов не происходит. Такой подход используется для экономии вычислительных ресурсов и является допустимым, поскольку информации, полученной с первых двух вступлений, достаточно для определения внутренней структуры среды.

Сигналы сканирования со стороны мрамора представлены на рисунке 4.19, а слоистая структура на рисунке 4.20.

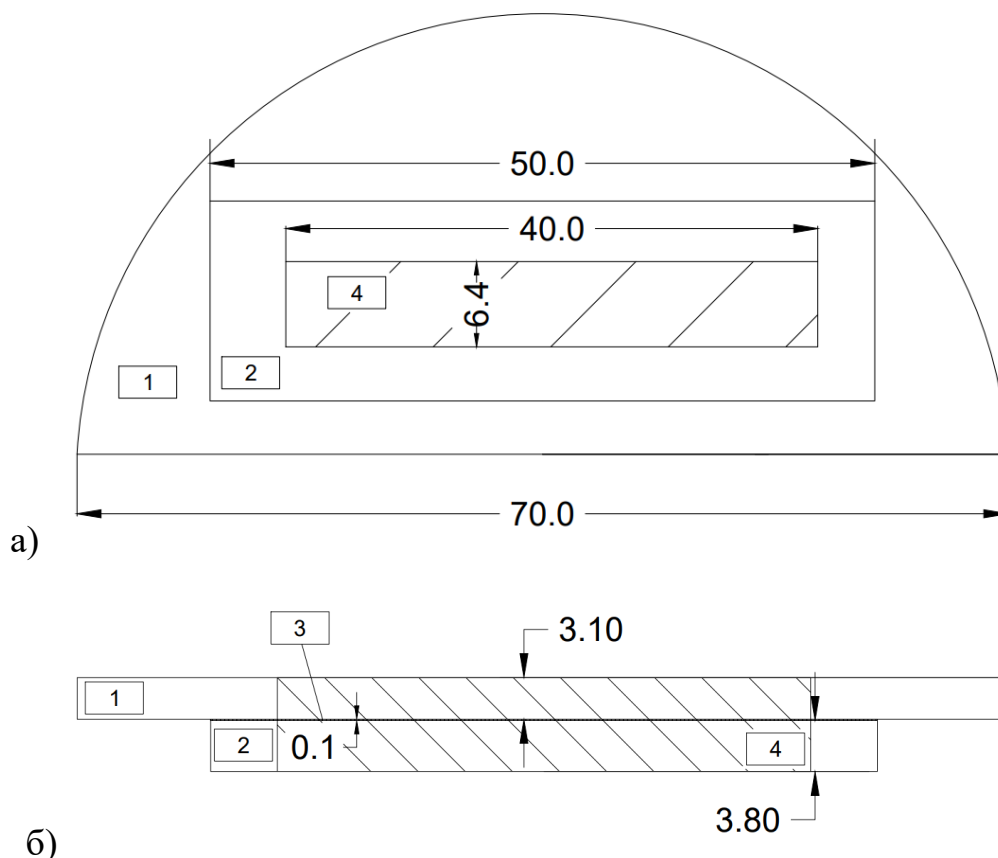


Рисунок 4.21 - Схема образца АМ: **а** - вид сверху; **б** – вид сбоку.

Размеры указаны в мм

1. Пластина аргиллита
2. Пластина мрамора
3. Клеевой слой
4. Область сканирования

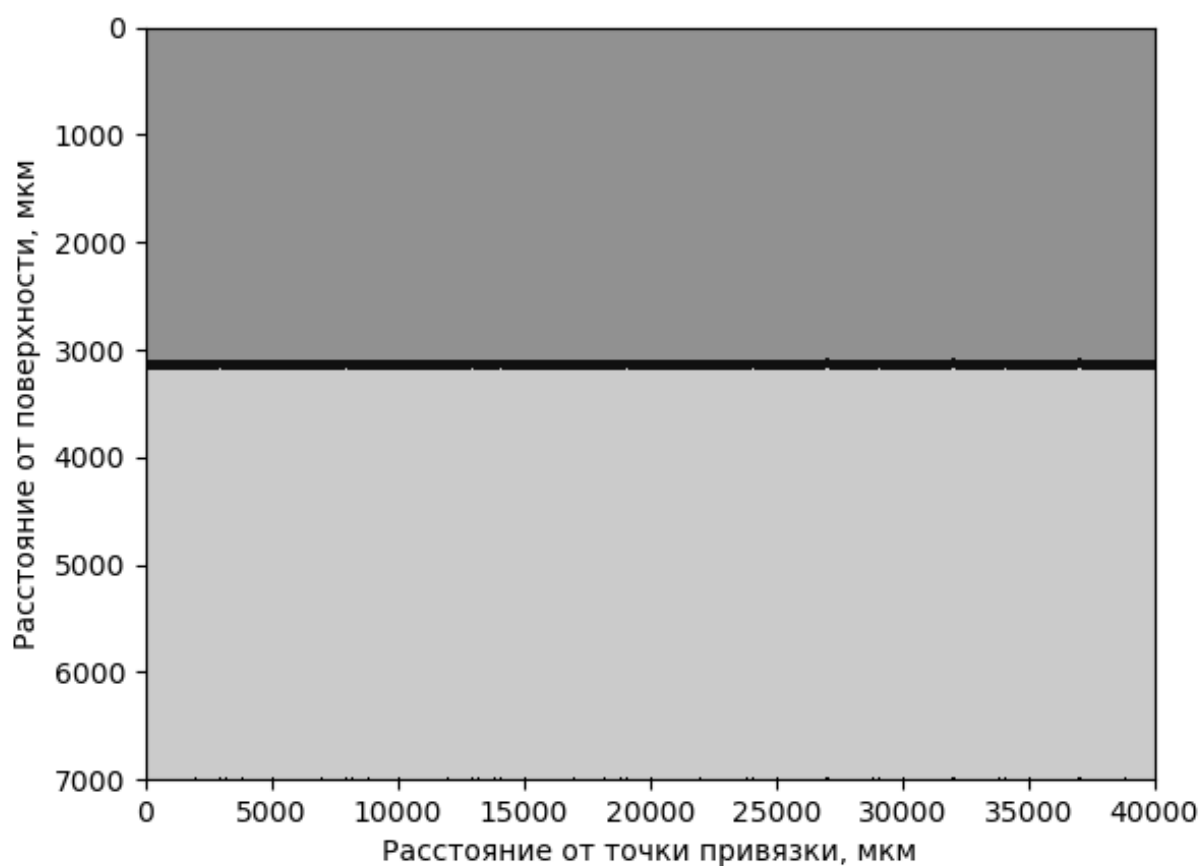


Рисунок 4.22 - Изображение внутренней структуры образца АМ, полученное расшифровкой изменений в прошедшем через него широкополосном акустическом сигнале

На рисунке 4.22 приведено изображение внутренней структуры образца, а сравнение численных значений характеристик, полученных в результате применения предлагаемого метода (расчетных) и измеренных традиционными способами, приведено в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Численные значения характеристик образца “АМ”, полученные в результате применения предлагаемого метода (расчетных) и измеренных традиционными способами (номера в шапке таблицы соответствуют обозначениям рис. 4.21)

Характеристика	Аргиллит (1)	Мрамор (2)	Клеевой слой (3)	Полный образец
Расчетные значения				
Скорость звука, м/с	4889	6254	1495	5582
Плотность, кг/м ³	2276	2683	887	-
Толщина, мм	3.1	3.8	0.10	7.00
Измеренные значения				
Скорость звука, м/с	4935	6321	1452	5621
Толщина, мм	3.1	3.8	-	7.00

4.3.4 Образец “АQM”

Представленный образец состоит из склеенных между собой пластин аргиллита, железистого кварцита и мрамора без внедренных дефектов. Целью исследования в случае данного образца является оценка работы метода в условиях большого количества переотражений и значительного различия акустических импедансов составляющих образец пород. Все три породы обладают высокой однородностью структуры и большими величинами скорости распространения звука. Эффекты дисперсии фазовой скорости и влияние частотного характера затухания мало выражены. Как и в случае с образцом “АМ”, по всей линии сканирования сигнал почти не меняется как с одной, так и с другой стороны сканирования. Типичные сигналы со сторон аргиллита и мрамора представлены на рисунках 4.23 и 4.25 соответственно. Несмотря на четкость сигнала, визуальный анализ позволяет различить лишь первые два слоя, сигнал от третьего слоя скрывается переотражениями (рис.

4.19, 4.21). В отличие от визуального, анализ предложенным методом выделяет все слои, причем в результатах определения характеристик по сканам с различных сторон не наблюдается значительных отличий (рис. 4.20, 4.22).

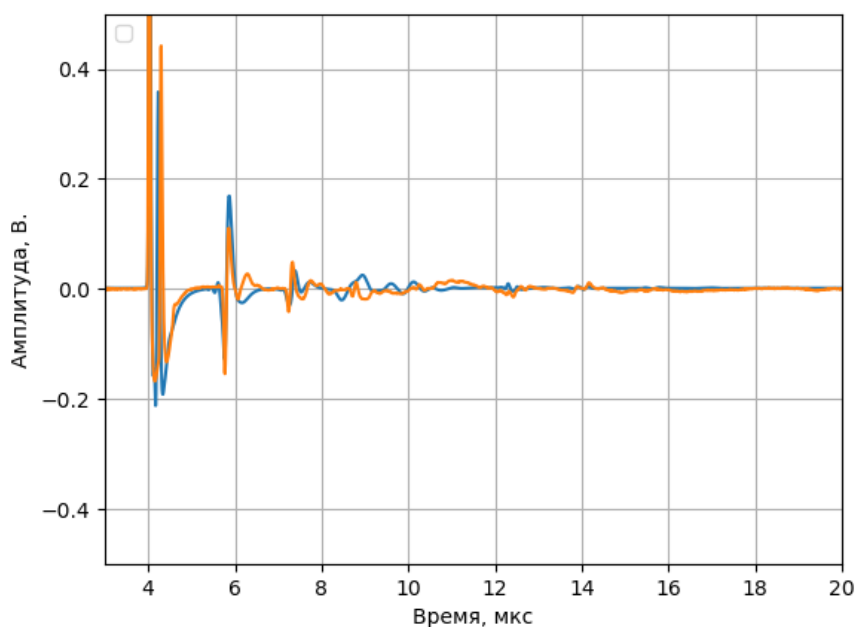


Рисунок 4.23 - Измеренный и модельный сигналы сканирования со стороны аргиллита, оранжевым и синим цветом соответственно

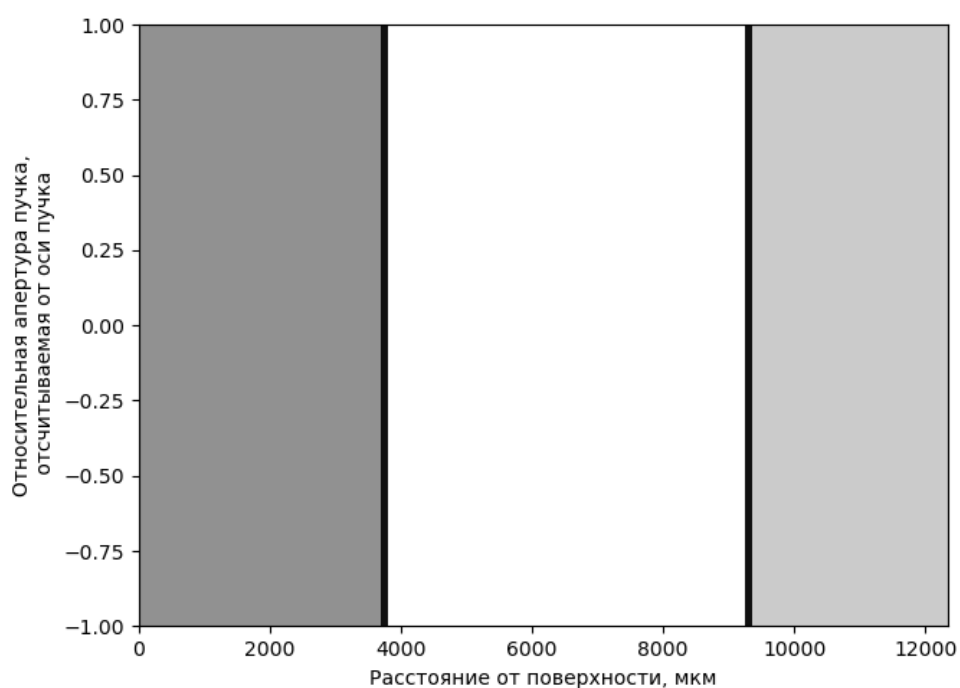


Рисунок 4.24 - Слоистая структура, определенная со стороны аргиллита

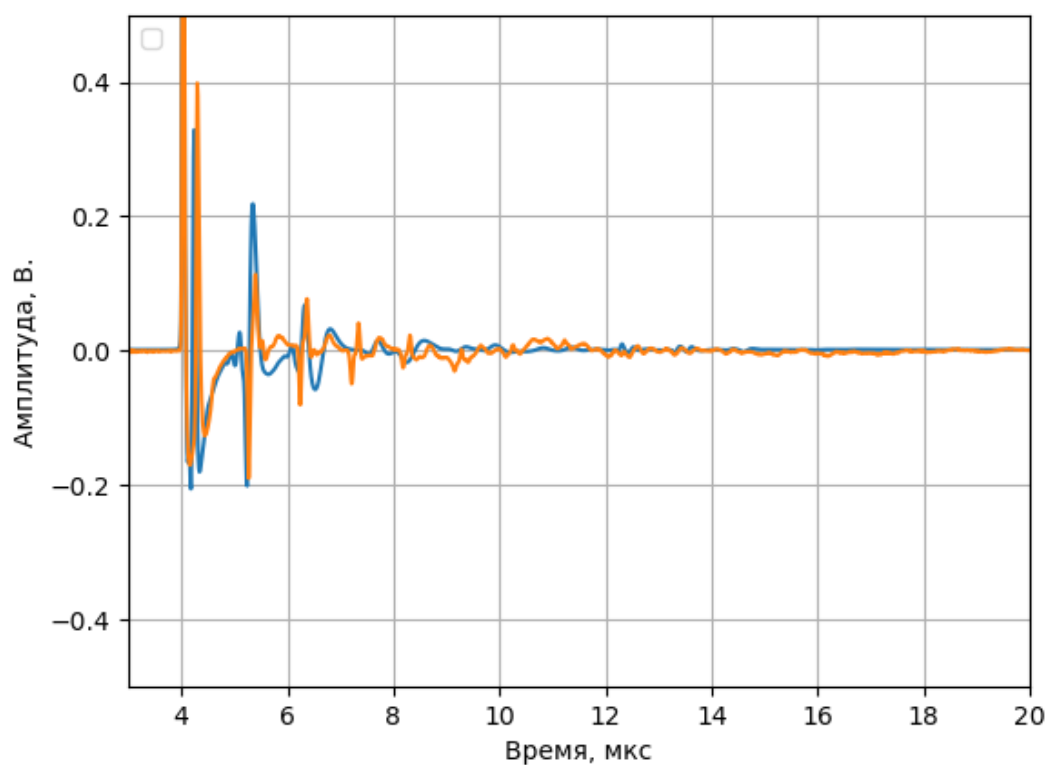


Рисунок 4.25 - Измеренный и модельный сигналы сканирования со стороны мрамора, оранжевым и синим цветом соответственно

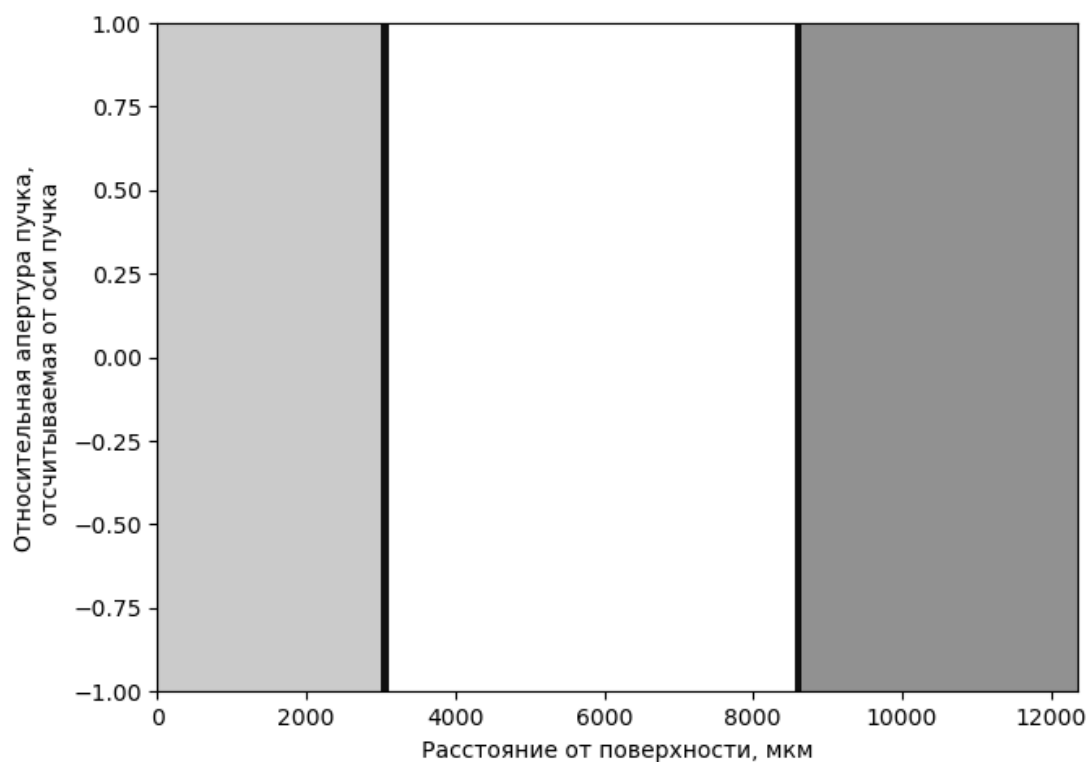


Рисунок 4.26 - Слоистая структура, определенная со стороны мрамора

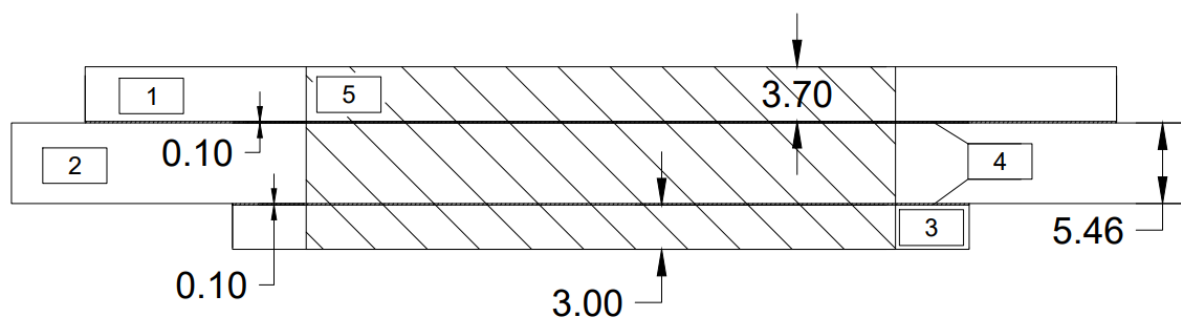


Рисунок 4.27 - Схема образца AQM, вид сбоку.

Размеры указаны в мм

1. Пластина аргиллита
2. Пластина железистого кварцита
3. Пластина мрамора
4. Клеевые слои
5. Область сканирования

На рисунке 4.28 приведено полученное изображение внутренней структуры образца, а сравнение численных значений характеристик, полученных в результате применения предлагаемого метода (расчетных) и измеренных традиционными способами, приведено в таблице 4.6.

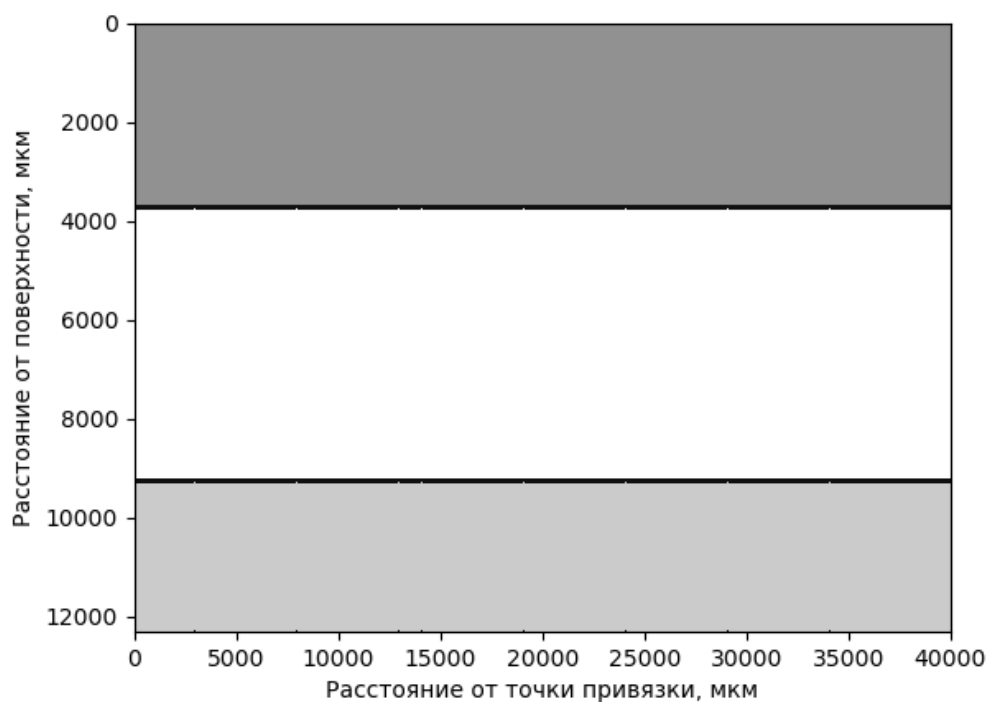


Рисунок 4.28 - Изображение внутренней структуры образца AQM, полученное расшифровкой изменений в прошедшем через него широкополосном акустическом сигнале

Таблица 4.6 - Численные значения характеристик образца “АQM”, полученные в результате применения предлагаемого метода (расчетных) и измеренных традиционными способами (номера в шапке таблицы соответствуют обозначениям рис. 4.27)

Характеристика	Аргиллит (1)	Кварцит (2)	Мрамор (3)	Клеевые слои (4)	Полный образец
Расчетные значения					
Скорость звука, м/с	4886	8362	6025	1433	6744
Плотность, кг/м ³	2282	2729	2678	887	2595
Толщина, мм	3.70	5.46	3.00	0.10	12.16
Измеренные значения					
Скорость звука, м/с	4928	8373	6063	1452	1452
Толщина, мм	3.70	5.46	3.00	-	-

4.3.5 Образец “АсМ”

Данный образец состоит из пластины аргиллита и пластины мрамора, склеенных между собой. В пластине аргиллита высверлена неоднородность конической формы с диаметром у основания три миллиметра и глубиной около полутора миллиметров. Исследование данного образца демонстрирует снижение эффективности метода при диагностике неоднородностей, форма которых не вписывается в границы параксиального приближения.

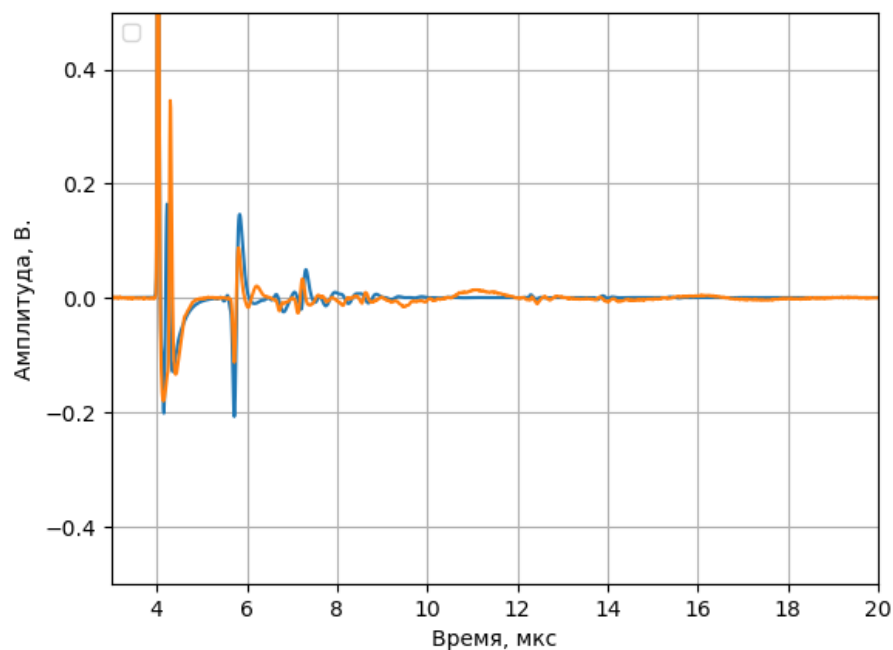


Рисунок 4.29 - Измеренный и модельный сигналы сканирования со стороны аргиллита, оранжевым цветом – сигнал измеренный за 1.5 мм до оси конуса по линии сканирования со стороны аргиллита и синим цветом - модельный сигнал, определенный по средним характеристикам образца вне зоны неоднородности

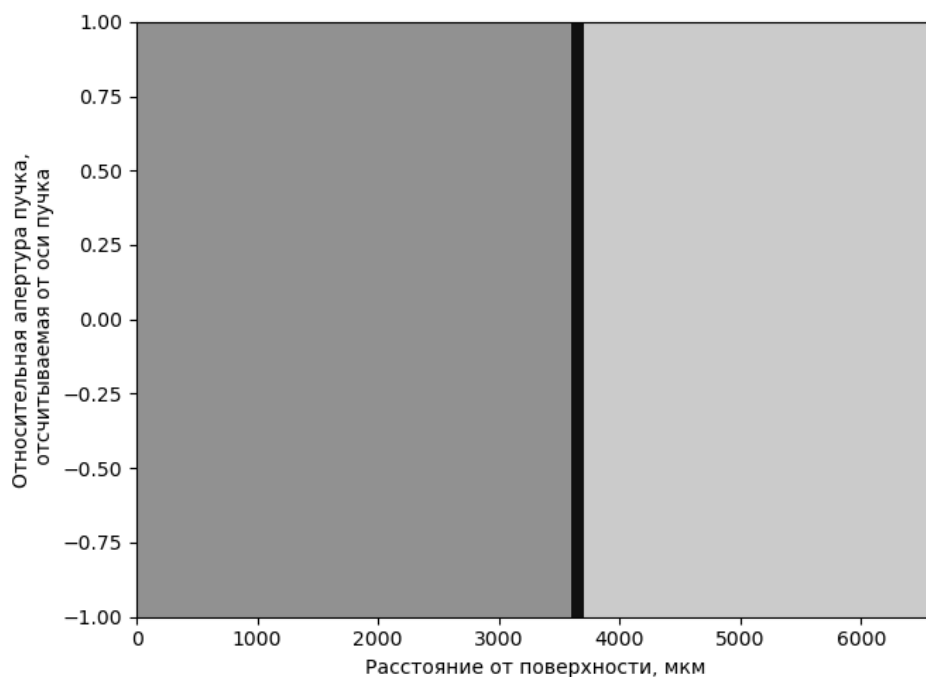


Рисунок 4.30 - Слоистая структура определенная по сигналу измеренному за 1.5 мм до оси конуса по линии сканирования со стороны аргиллита

На рисунках 4.29 и 4.33 оранжевым цветом представлены изображения измеренных в точках по линии сканирования, проходящей через ось конической неоднородности, со стороны аргиллита сигналов за полтора миллиметра до оси конуса и через полтора миллиметра после нее. На этих же рисунках синим цветом приведены модельные сигналы с характеристиками определенными вне зоны неоднородности. Из рисунков 4.29 и 4.33 видно, что акустический импеданс на первой границе в области сканирования, частично включающей неоднородность, значительно ниже, чем в других частях образца.

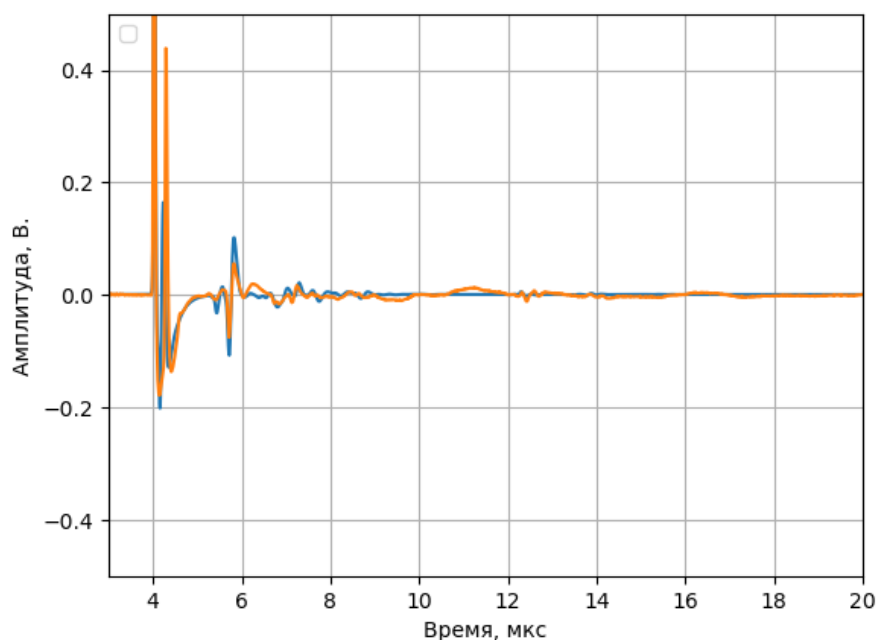


Рисунок 4.31 - Измеренный и модельный сигналы сканирования со стороны аргиллита, оранжевым цветом – сигнал измеренный на оси конуса по линии сканирования со стороны аргиллита и синим цветом - модельный сигнал, построенный по данному со средними характеристикам образца вне зоны неоднородности

На сигнале, измеренном непосредственно на оси конуса (рис. 4.31), просматривается сигнал от неоднородности, тогда как в соседних точках отраженного сигнала вообще не наблюдается (рис. 4.29 и 4.33). Меньший акустический импеданс при сохраняющейся скорости звука говорит о меньшей плотности в исследуемой области, но тогда преотраженный сигнал имел бы уменьшенную соответственно соотношению акустических

импедансов амплитуду. В данном случае амплитуда переотраженного сигнала уменьшается в степени большей, чем определенная соотношением акустических импедансов. Это связано с выходом за рамки параксиального приближения в области неоднородности, что приводит к большему рассеянию амплитуды на неоднородности.

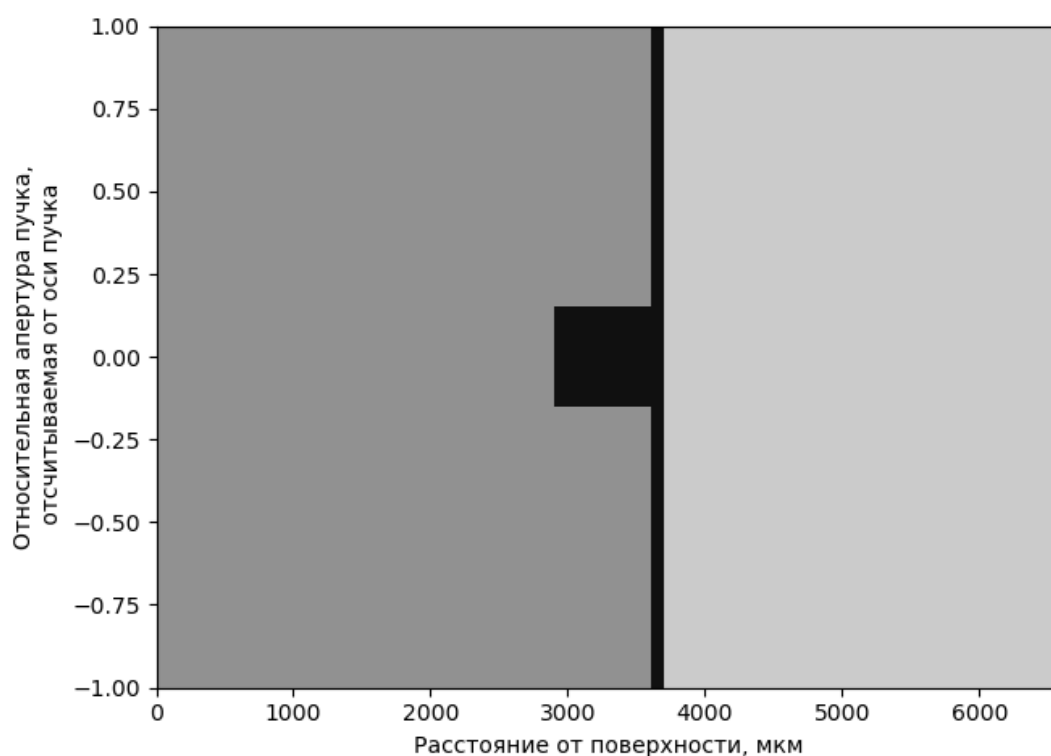


Рисунок 4.32 - Слоистая структура, определенная по сигналу измеренному на оси конуса по линии сканирования со стороны аргиллита

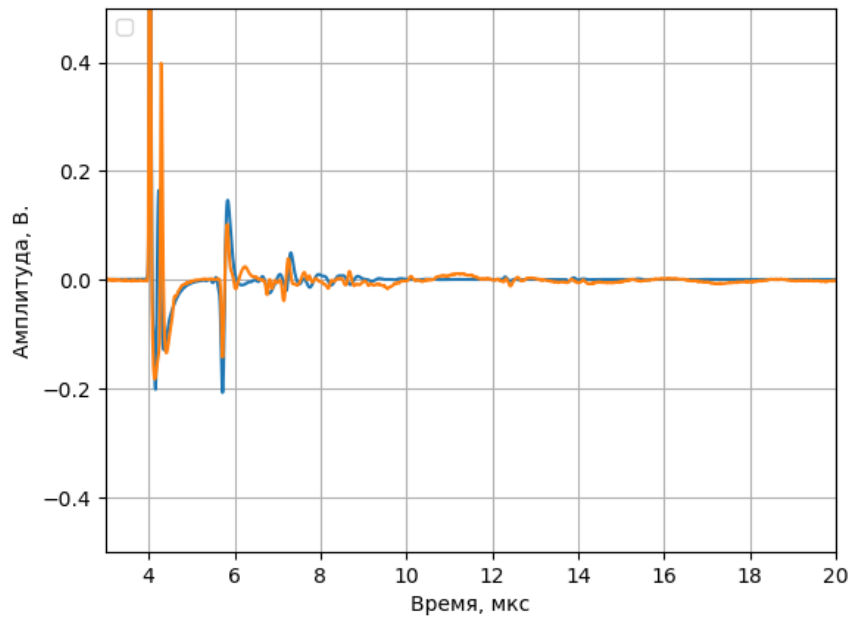


Рисунок 4.33 - Измеренный и модельный сигналы сканирования со стороны аргиллита, оранжевым цветом – измеренный через 1.5 мм после оси конуса по линии сканирования со стороны аргиллита сигнал и синим цветом - модельный сигнал, определенный по средним характеристикам образца вне зоны неоднородности

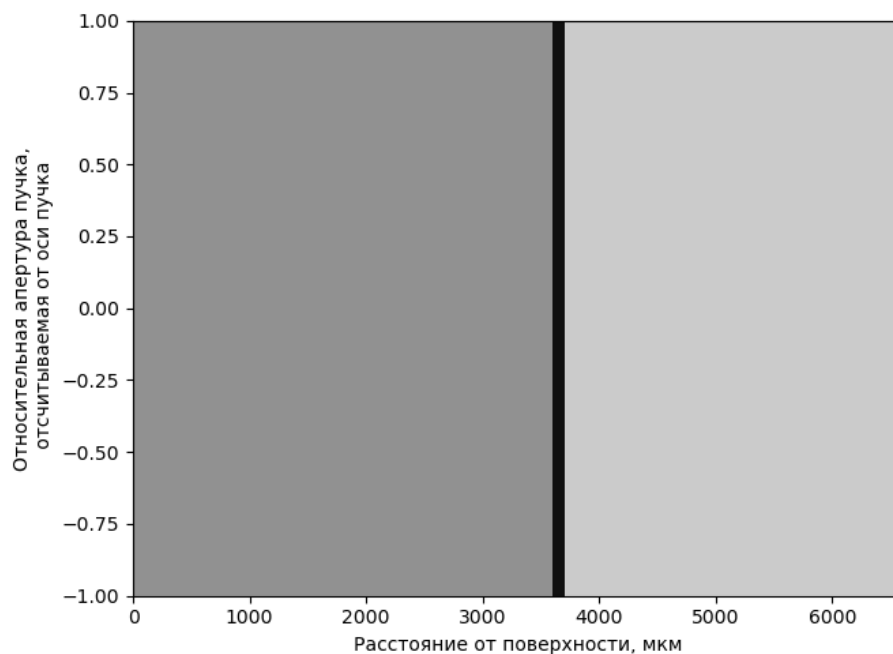


Рисунок 4.34 - Слоистая структура, определенная по измеренному через 1.5 мм после оси конуса по линии сканирования со стороны аргиллита сигналу

На рисунках 4.35 и 4.36 представлены измеренный и определенный по нему модельный сигнал вне области неоднородности при сканировании со стороны мрамора и соответствующая слоистая структура. Далее для сравнения с результатами сканирования со стороны аргиллита на рисунках 4.37 и 4.41 представлены сигналы в точках за 1,5 мм до и через 1,5 мм после оси конуса по линии сканирования соответственно, а на рисунке 4.39 представлен измеренный на оси конуса сигнал. Соответствующие этим сигналам слоистые структуры представлены на рисунках 4.38, 4.40, 4.42.

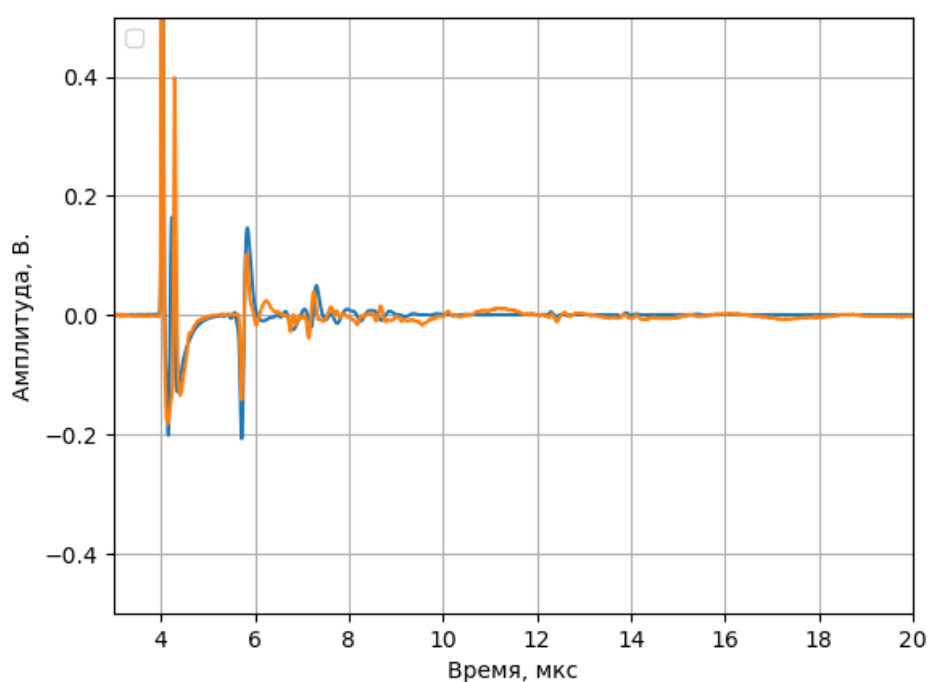


Рисунок 4.35 - Измеренный и модельный сигналы сканирования вне области неоднородности со стороны мрамора, оранжевым и синим цветом соответственно

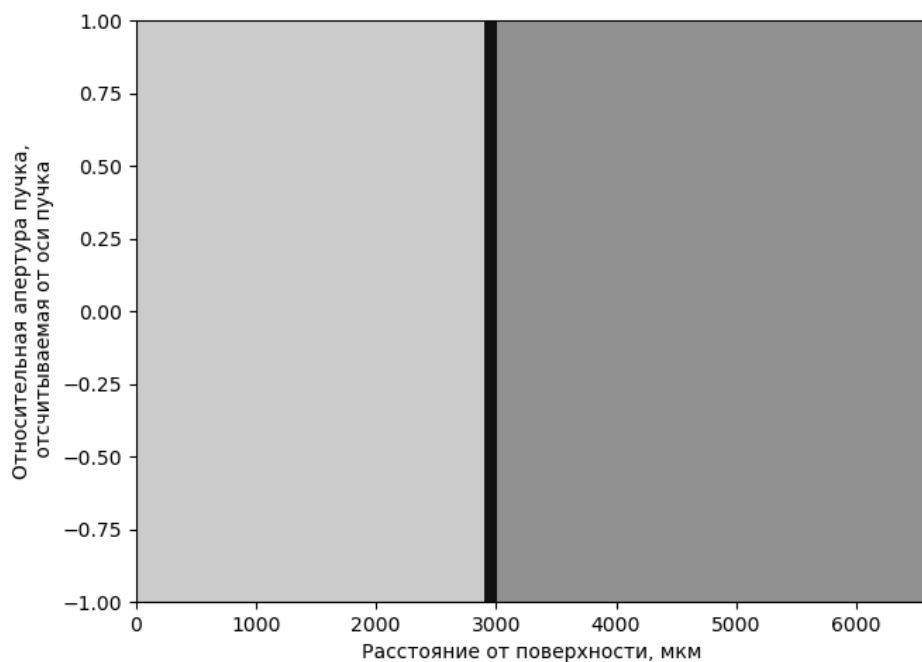


Рисунок 4.36 - Слоистая структура, определенная по измеренному вне области неоднородности со стороны мрамора сигналу

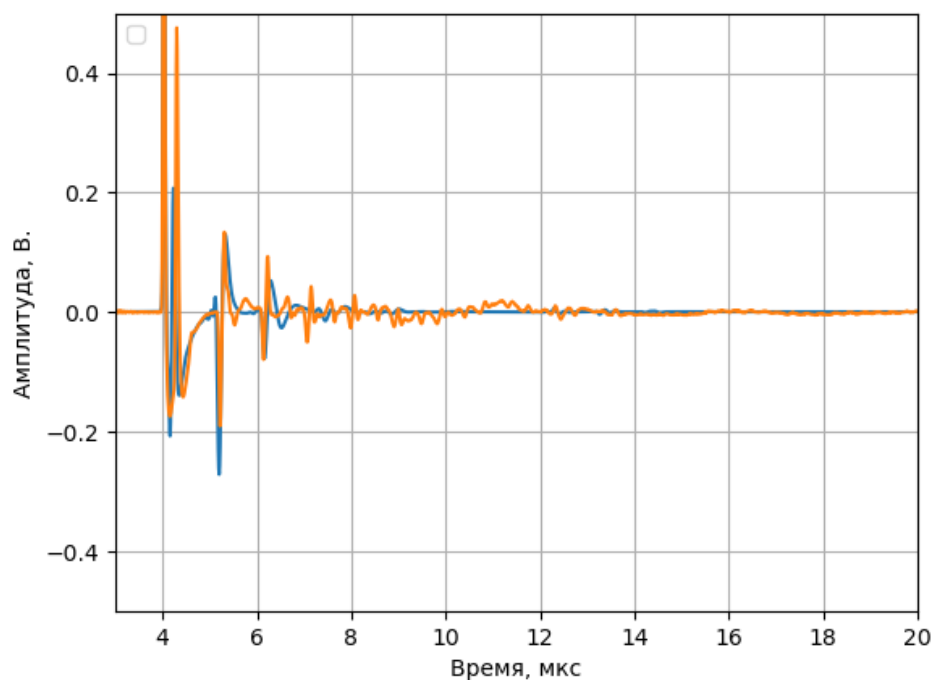


Рисунок 4.37 - Измеренный и модельный сигналы сканирования со стороны мрамора, оранжевым цветом – сигнал измеренный за 1.5 мм до оси конуса по линии сканирования со стороны мрамора и синим цветом - соответствующий ему модельный сигнал

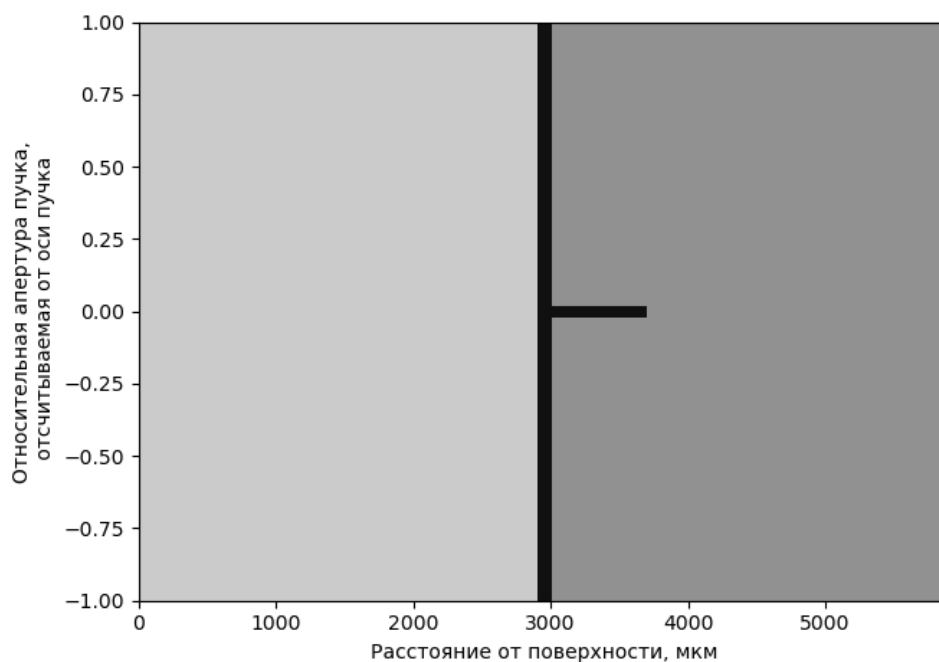


Рисунок 4.38 - Слоистая структура, определенная по измеренному за 1.5 мм до оси конуса по линии сканирования со стороны мраморасигналу

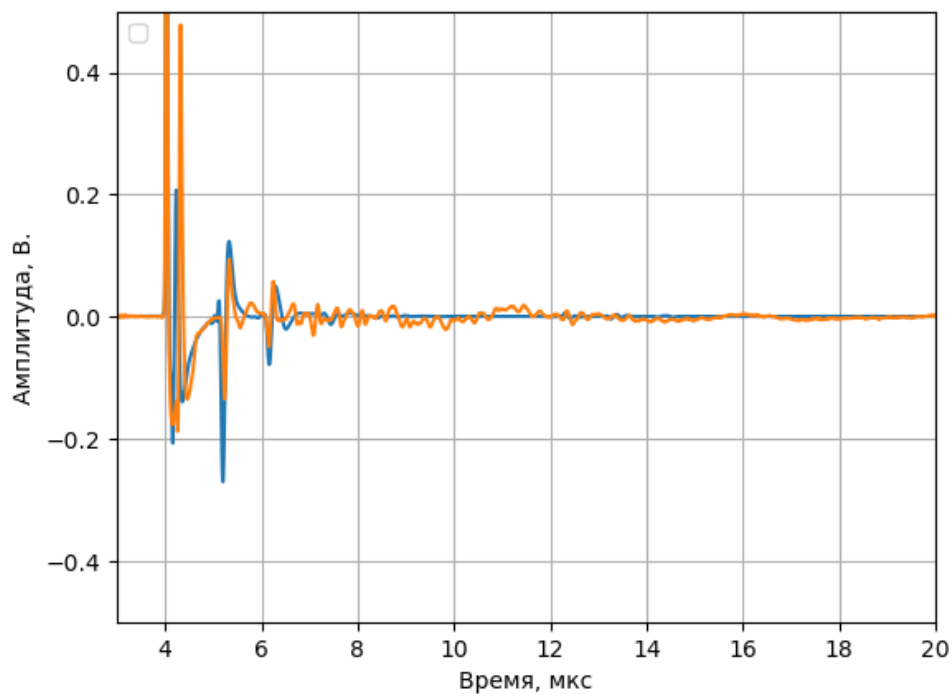


Рисунок 4.39 - Измеренный и модельный сигналы сканирования со стороны мрамора, оранжевым цветом – сигнал измеренный на оси конуса по линии сканирования со стороны мрамора и синим цветом - соответствующий ему модельный сигнал

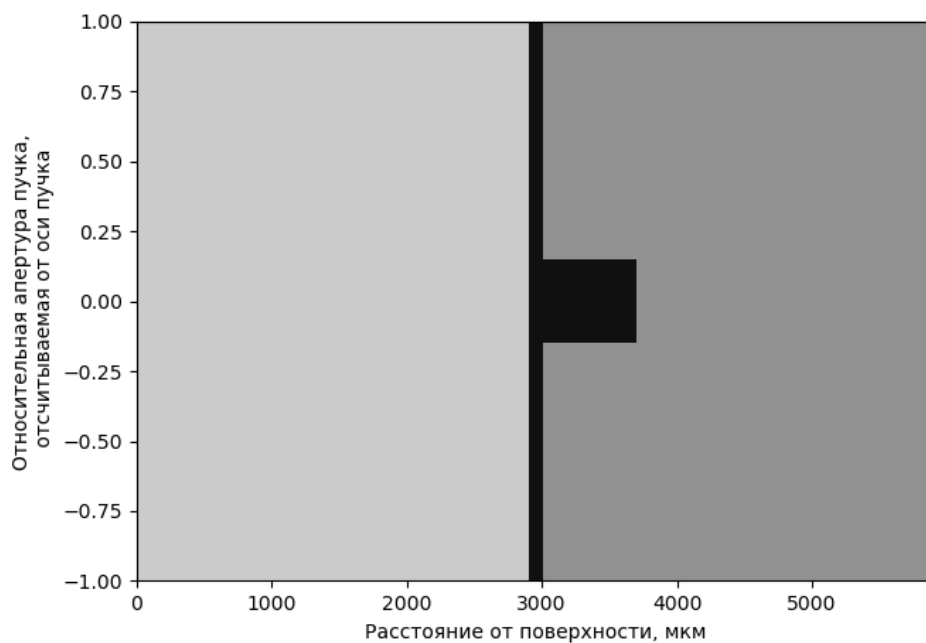


Рисунок 4.40 - Слоистая структура, определенная по измеренному на оси конуса по линии сканирования со стороны мрамора сигналу

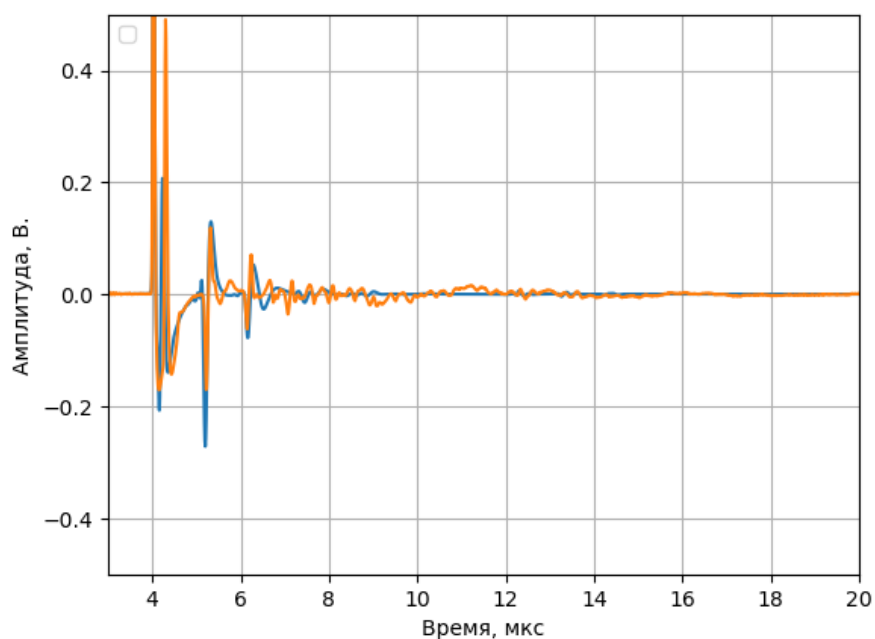


Рисунок 4.41 - Измеренный и модельный сигналы сканирования со стороны мрамора, оранжевым цветом – сигнал измеренный через 1.5 мм после оси конуса по линии сканирования со стороны мрамора и синим цветом - соответствующий ему модельный сигнал

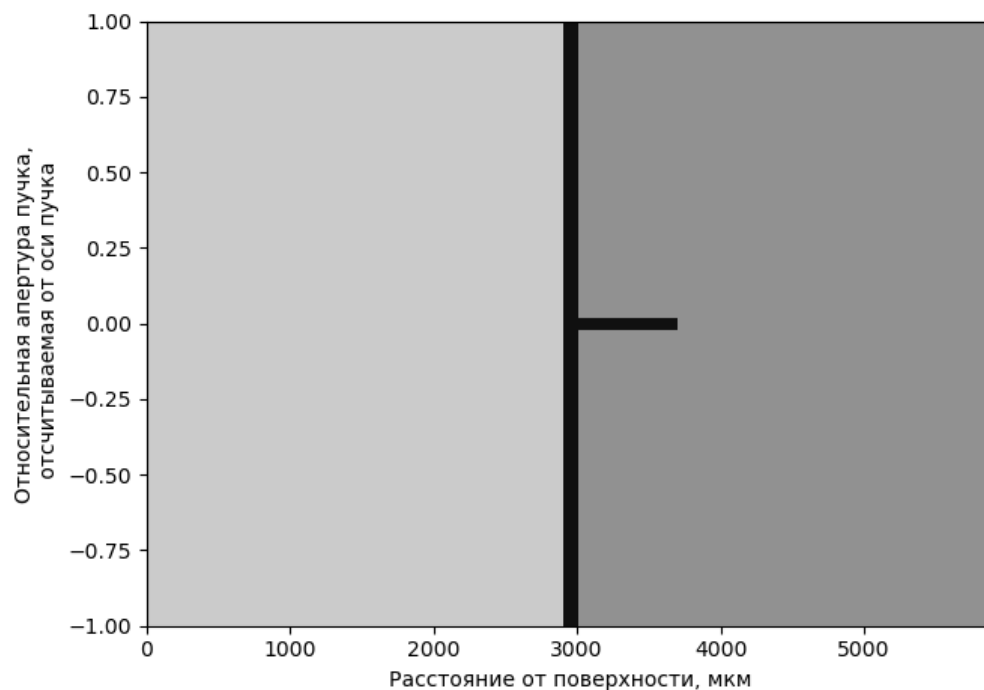


Рисунок 4.42 - Слоистая структура, определенная по измеренному через 1.5 мм после оси конуса по линии сканирования со стороны мрамора сигналу

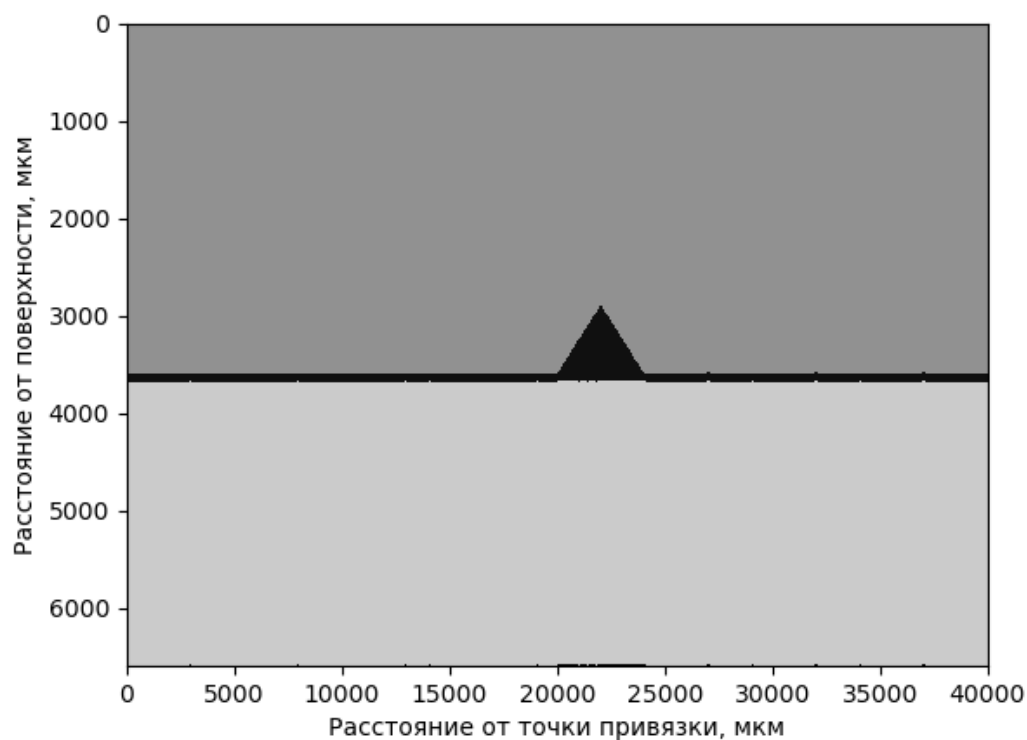


Рисунок 4.43 - Изображение внутренней структуры образца АсМ, полученное расшифровкой изменений в прошедшем через него широкополосном акустическом сигнале

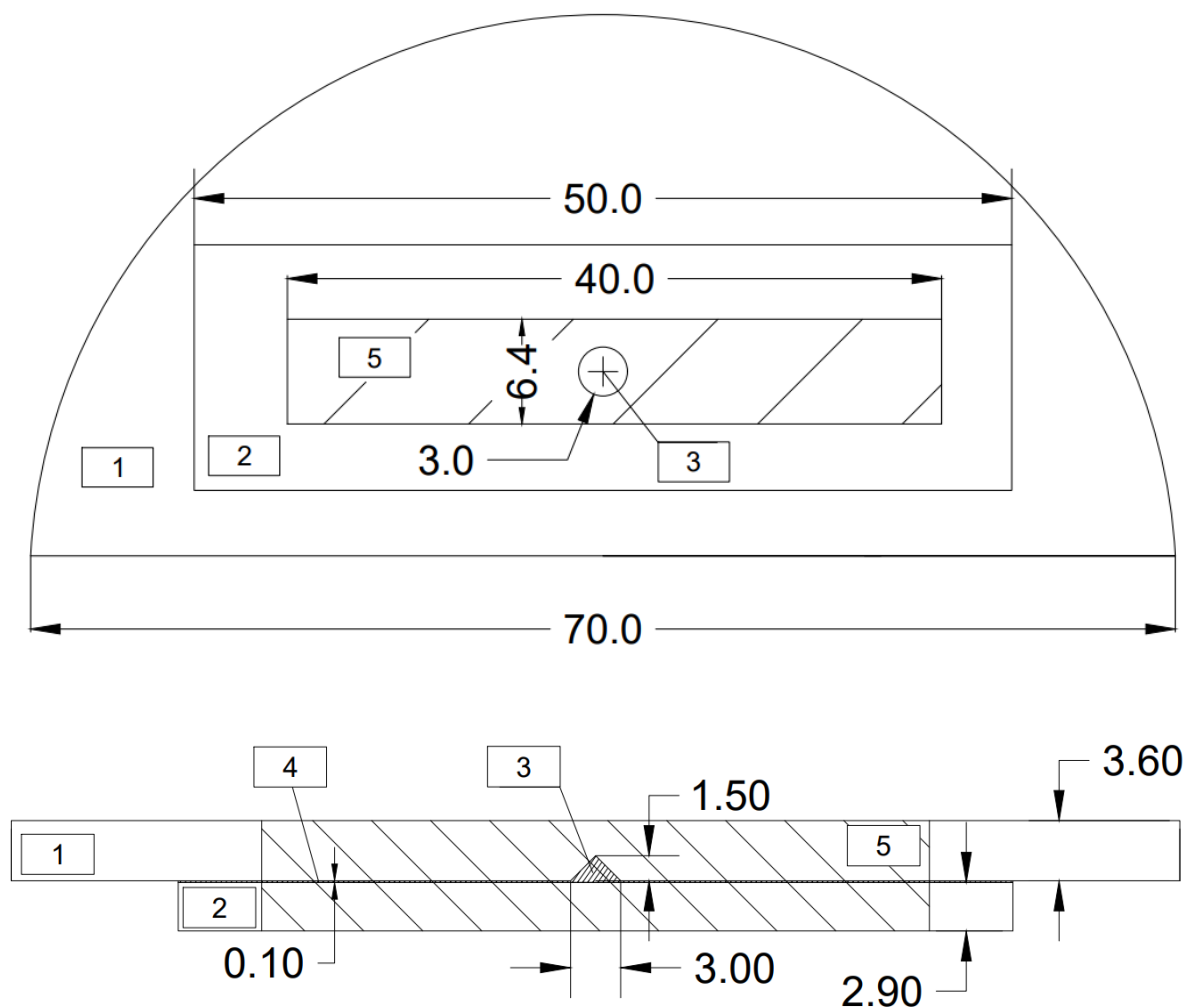


Рисунок 4.44 - Схема образца АСМ: **а** - вид сверху; **б** – вид сбоку.

Размеры указаны в мм

1. Пластина аргиллита с неоднородностью
2. Пластина мрамора
3. Коническое отверстие
4. Клеевой слой
5. Область сканирования

Анализ сигналов при сканировании со стороны мрамора подтверждает наличие неоднородности и её форму в поперечном сканированию сечении (рис. 4.37, 4.39, 4.41). Изображение внутренней структуры образца, определенное при сканировании со стороны аргиллита, представлено на рисунке 4.43, а Сравнение численных значений характеристик, полученных в результате применения предлагаемого метода (расчетных) и измеренных традиционными способами, приведено в таблице 4.7. Важно отметить, что применение предложенного метода позволило определить коническую форму

неоднородности, а определенная этим методом толщина неоднородности приблизительно равна половине высоты конуса, что соответствует приближению «квазиоднородности» каждого слоя.

Таблица 4.7 - Численные значения характеристик образца “АсМ”, полученные в результате применения предлагаемого метода (расчетных) и измеренных традиционными способами (номера в шапке таблицы соответствуют обозначениям рис. 4.44)

Характеристика	Аргиллит (1)	Конус (3)	Клеевой слой (4)	Мрамор (2)	Полный образец
Расчетные значения					
Скорость звука, м/с	4937	1436	1436	5954	5 331
Плотность, кг/м ³	2294	885	885	2666	2567
Толщина, мм	3.60	0.70	0.10	2.90	6.60
Диаметр, мм	-	3.0	-	-	-
Измеренные значения					
Скорость звука, м/с	5001	-	1452	6013	5 394
Толщина, мм	3.60	-	-	2.90	6.60
Диаметр, мм	-	3.0	-	-	-

4.3.6 Образец “L1L”

Образец представляет собой две склеенные между собой пластины известняка. В одной из пластин высверлено отверстие диаметром 1 мм. Обозначим целую пластину L, а пластину с отверстием L1. Исследование данного образца демонстрирует затрудненность определения структур высокой общей неоднородности. В образце наблюдается значительное затухание сигнала и ярко выраженный эффект дисперсии фазовой скорости и влияние частотного характера затухания (рис. 4.45).

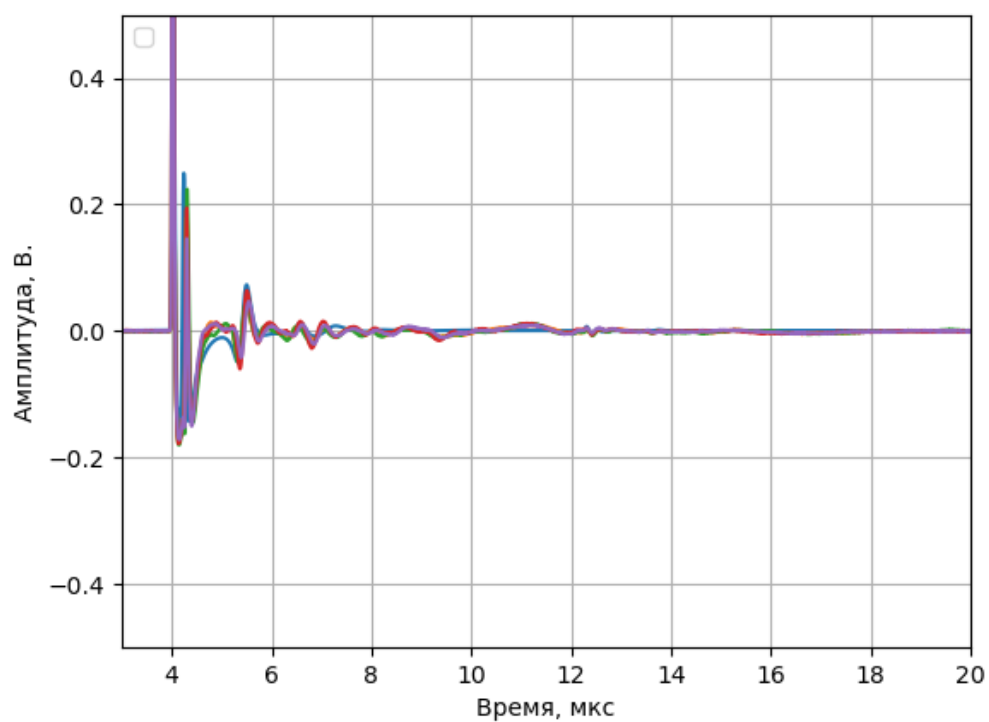


Рисунок 4.45 - Сигналы, полученные со стороны пластины L. Цветовые обозначения соответствуют приведенным в таблице 4.8

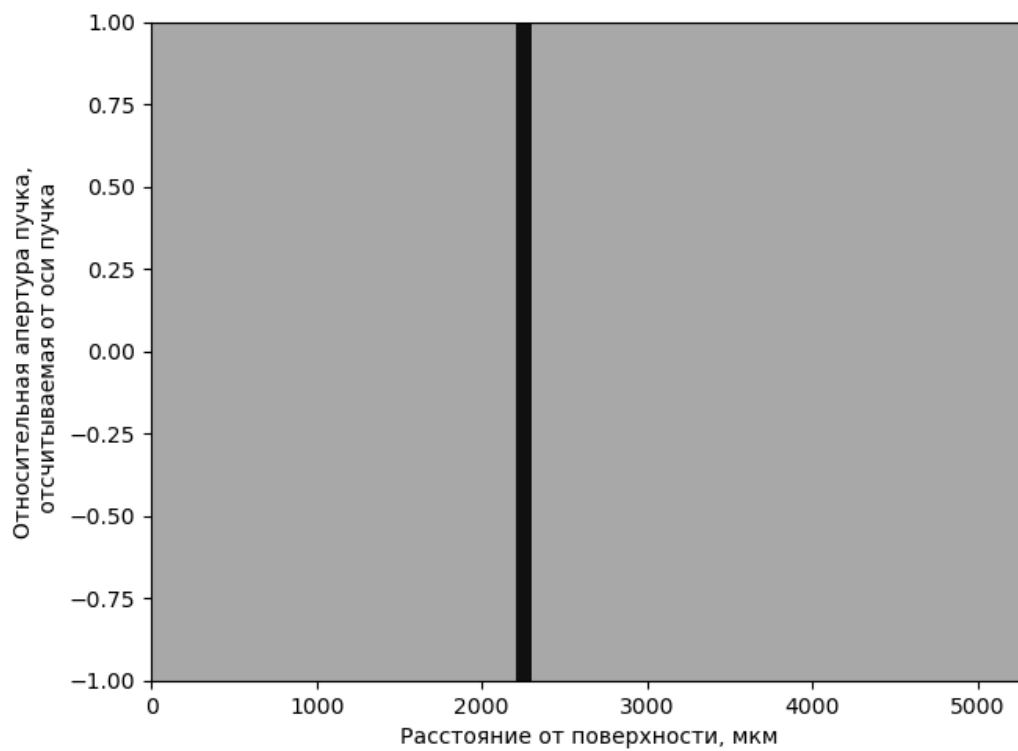


Рисунок 4.46 - Слоистая структура, определенная по усредненным характеристикам сигналов со стороны пластины L.

Таблица 4.8 - Цветовые обозначения сигналов

Линия	Описание
Красная	Сигнал, полученный в начальной точке области сканирования
Зеленая	Сигнал, полученный в конечной точке области сканирования
Фиолетовая	Сигнал, полученный в точке за 1.5 мм до оси отверстия по линии сканирования
Оранжевая	Сигнал, полученный в точке на оси отверстия
Синяя	Модельный сигнал

На рисунке 4.45 представлен набор сигналов со стороны пластины L, все сигналы идентичны между собой, имеющиеся отличия обусловлены общей неоднородностью известняка. Высокая степень затухания скрывает любые возможные отличия формы в области сканирования, включающей отверстие.

На рисунке 4.47 представлен общий набор сигналов со стороны пластины L1 известняка с отверстием. Эти сигналы также обладают высокой идентичностью, за исключением одного, который рассмотрен далее. Слоистая структура, построенная по усредненным характеристикам, приведена на рисунке 4.48.

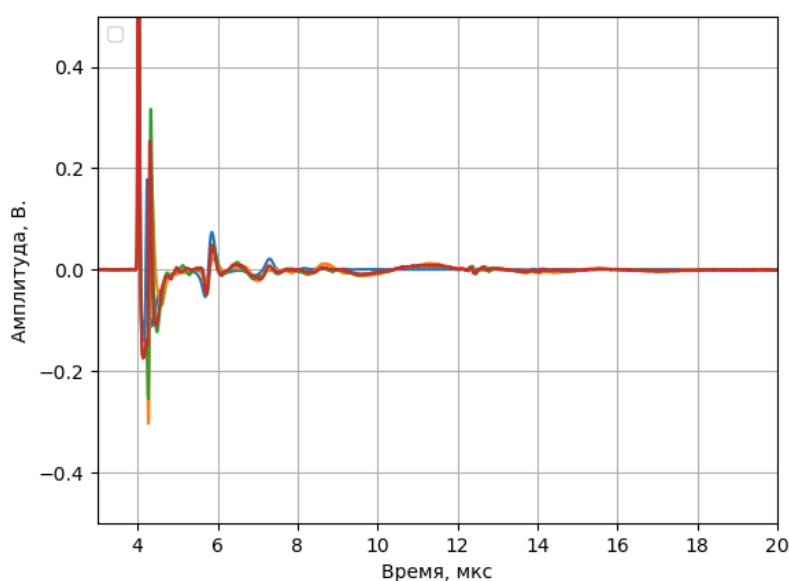


Рисунок 4.47 - Сигналы, полученные со стороны пластины L1. Цветовые обозначения соответствуют приведенным в таблице 4.8

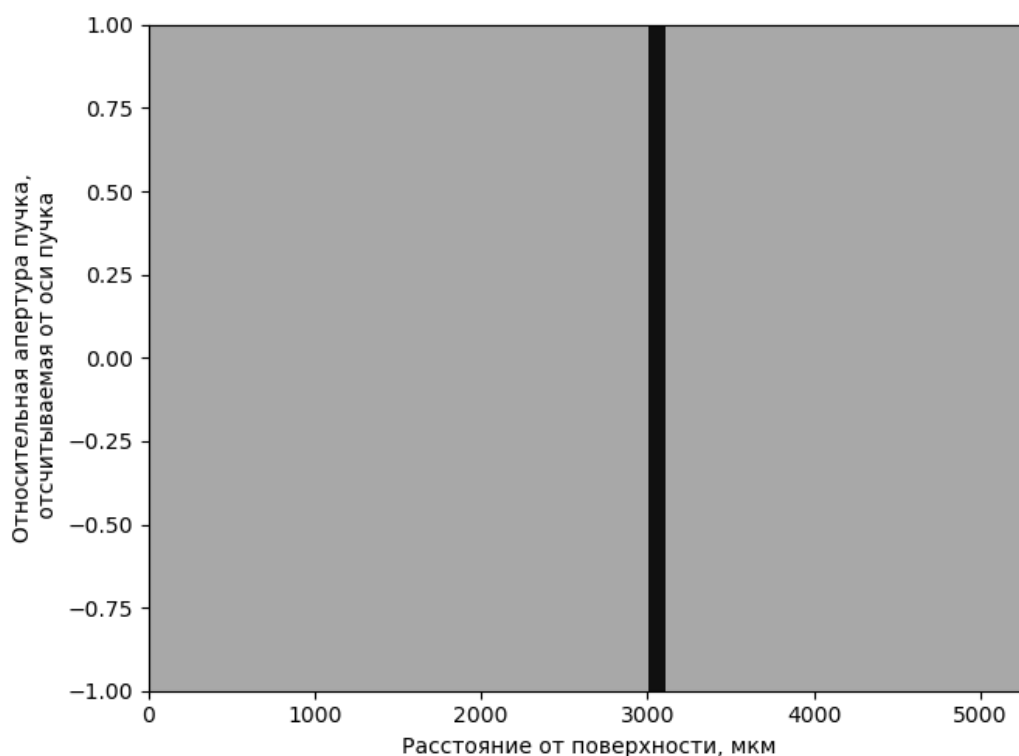


Рисунок 4.48 - Слоистая структура, определенная по усредненным характеристикам сигналов со стороны пластины L1

Рассмотрим подробнее сигнал, отличающийся от типичных для пластины известняка с отверстием. Этот сигнал относится к точке сканирования в центре отверстия. Анализ отличий говорит о меньшей скорости звука и соответственно меньшем акустическом импедансе в слое L1. Из рис. 4.49 и 4.50 видно уменьшение амплитуды и скорости прихода граничного и особенно донного сигналов. Меньшая скорость и акустический импеданс уже в первом слое говорит о большой (для размеров пучка) области неоднородности. Определенная для этой области слоистая структура представлена на рисунке 4.51.

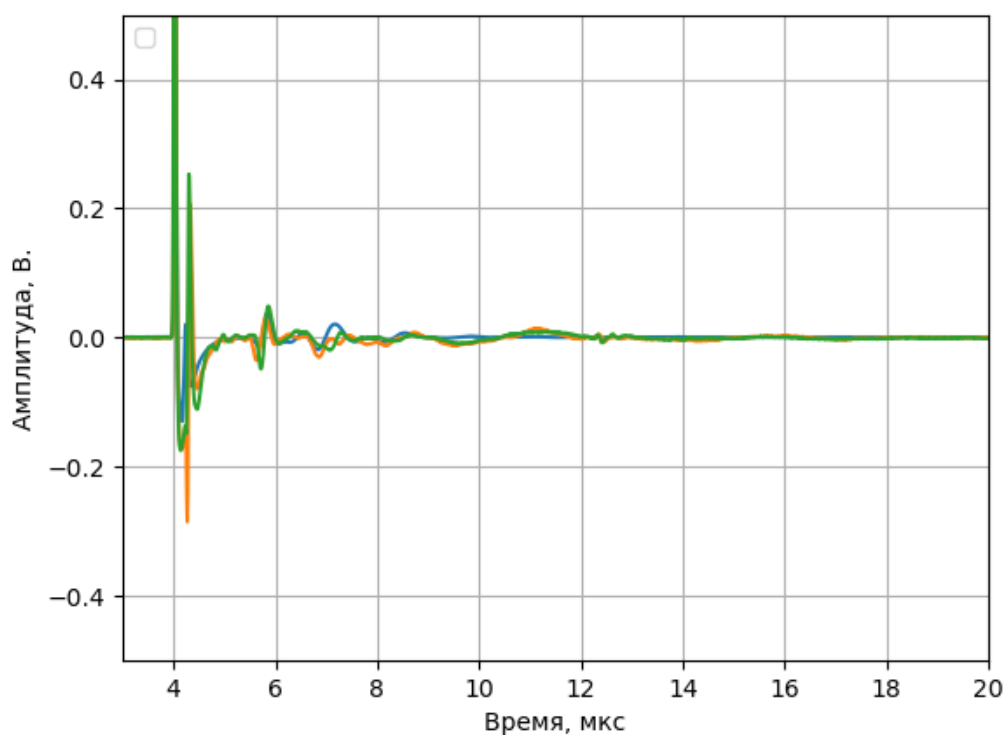


Рисунок 4.49 - Изображение сигналов со стороны L1 в полном размере. Оранжевым – сигнал из области с отверстием, синим – модельный, для этой области, зеленым – типичный сигнал для остальной части образца

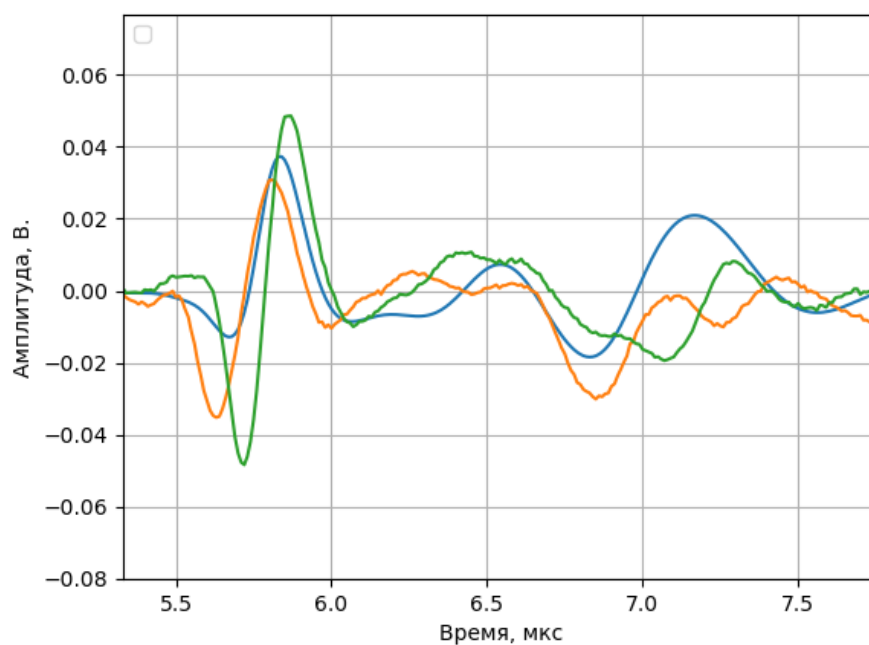


Рисунок 4.50 - Изображение сигналов со стороны L1 в масштабе на граничный и донный сигналы. Оранжевым – сигнал из области с отверстием, синим – модельный, для этой области, зеленым – типичный сигнал для остальной части образца

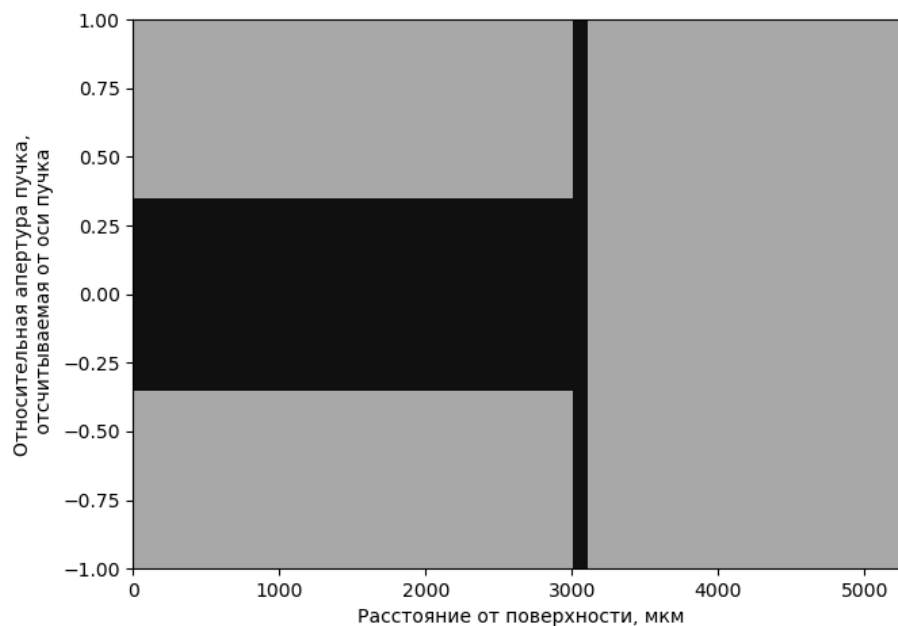


Рисунок 4.51 - Слоистая структура, определенная по сигналу со стороны L1 из точки сканирования в центре отверстия.

Определенный по сигналу с точки из центра отверстия размер неоднородности в поперечном направлении сканирования сечения равен 2,3 мм. В соседних по линии сканирования точках область неоднородности незаметна, что невозможно при таких поперечных размерах неоднородности (шаг сканирования 1.5 мм). Дополнительные измерения показывают резкое уменьшение области при малейшем отдалении (~ 0.5 мм). Таким образом, размер неоднородности в поперечном сечении, определенный с учетом дополнительных данных, равен 1.5 мм при реальном значении 1 мм. Такое отклонение связано с заполнением пустот известняка клеем на некоторую глубину (около 1 – 2 мм) и образованием области с градиентно меняющимися физико-механическими свойствами среды.

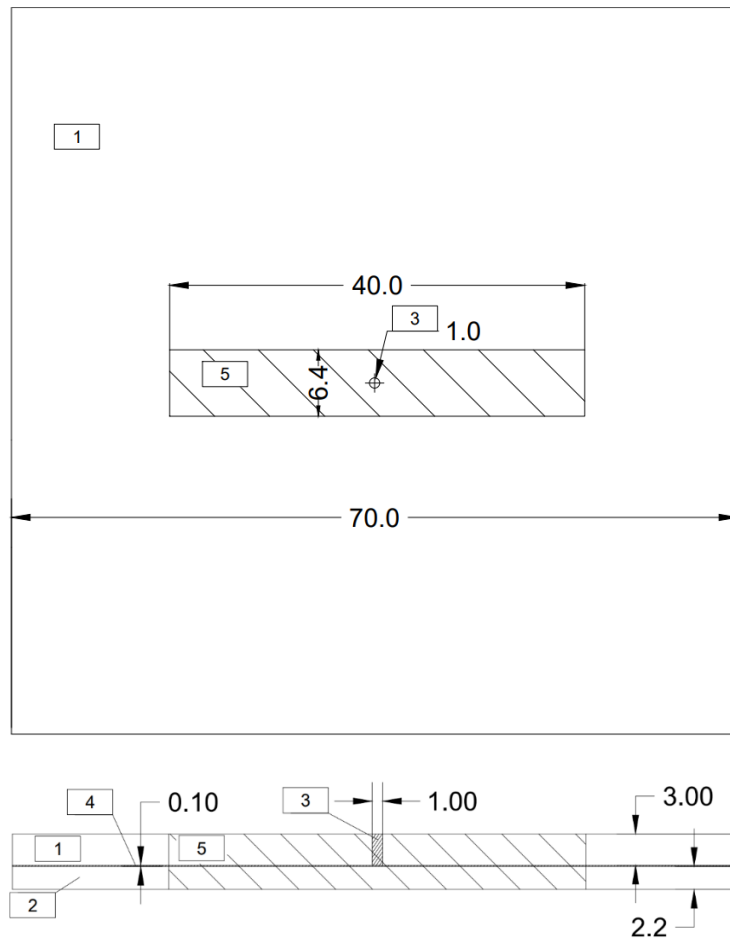


Рисунок 4.52 - Схема образца L1L: **а** - вид сверху; **б** – вид сбоку.

Размеры указаны в мм

1. Пластина известняка с неоднородностью
2. Пластина известняка
3. Отверстие
4. Клеевой слой
5. Область сканирования

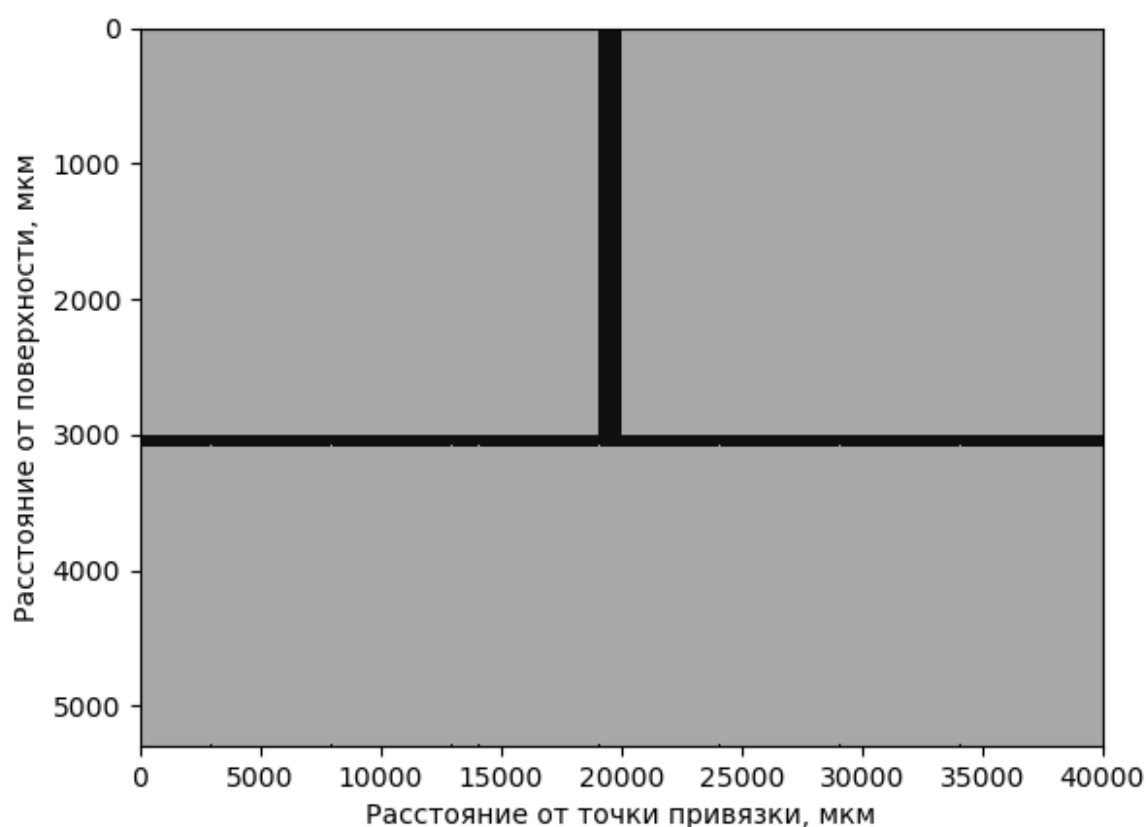


Рисунок 4.53 - Изображение внутренней структуры образца L1L, полученное расшифровкой изменений в прошедшем через него широкополосном акустическом сигнале

Определенное по полученным данным изображение внутренней структуры образца представлено на рисунке 4.53. Сравнение численных значений характеристик, полученных в результате применения предлагаемого метода (расчетных) и измеренных традиционными способами, приведено в таблице 4.9. Значительные отличия скоростей звука в известняке при незначительном отклонении полной скорости звука также подтверждает наличие близкой к диффузионной области на границе раздела известняк – клей.

Таблица 4.9 - Численные значения характеристик образца “A1L”, полученные в результате применения предлагаемого метода (расчетных) и измеренных традиционными способами (номера в шапке таблицы соответствуют обозначениям рис. 4.52)

Характеристика	Известняк (1)	Известняк (2)	Отверстие (3)	Клеевой слой (4)	Полный образец
Расчетные значения					
Скорость звука, м/с	4537*	4563*	1382	1382	4488*
Плотность, кг/м ³	2916*	2893*	1854	1854	-
Толщина, мм	3.00	2.20	3.00	0.10	5.30
Диаметр, мм	-	-	1.50	-	-
Измеренные значения					
Скорость звука, м/с	4718*	4721*	-	1452	4524*
Толщина, мм	3.00	2.20	-	-	5.30
Диаметр, мм	-	-	1.00	-	-

* Помечены усредненные значения, так как из-за неоднородности известняка в различных точках значения скоростей варьировались.

Выводы

В данной главе приведено описание разработанного метода определения внутренней структуры и физико-механических свойств геоматериала с учетом дифракции, дисперсии фазовой скорости и частотнозависимого затухания, основанный на применении ABCD матриц. Проведена апробация разработанного метода определения внутренней структуры и создан алгоритм определения физико-механических свойств геоматериала на образцах горных пород по изменениям в падающем на неоднородный образец акустическом сигнале в результате прохождения его через исследуемый объект. С целью верификации метода проведено сравнение результатов исследования предложенным методом с результатами исследований, проведенных известными методами. Установлено, что размер, положение и значения

физико-механических характеристик отдельных структурных элементов исследованных образцов, могут быть определены предложенным методом и повторяют результаты, полученные другими методами, с минимальными отклонениями.

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Jonathan Simpson, Kasper van Wijk, Ludmila Adam, Caitlin Smith Laser ultrasonic measurements to estimate the elastic properties of rock samples under in situ conditions // Review of Scientific Instruments. -2019, -V. 90, -114503, DOI:10.1063/1.5120078
2. Tai-Ming He, Qi Zhao, Johnson Ha, Kaiwen Xia, Giovanni Grasselli Understanding progressive rock failure and associated seismicity using ultrasonic tomography and numerical simulation // Tunnelling and Underground Space Technology. -2018, -V. 81, -P. 26-34, DOI: 10.1016/j.tust.2018.06.022
3. A. Rodriguez-Rey, G. A. D. Briggs, T. A. Field, M. Montoto Acoustic microscopy of rocks // Journal of microscopy. -1990, -V. 160, -I. 1, -P. 21-29, DOI:10.1111/j.1365-2818.1990.tb03044.x
4. Prasad, Manika Mapping impedance microstructures in rocks with acoustic microscopy // The Leading Edge. -2001, -V. 20(2), -P. 172, DOI:10.1190/1.1438902
5. Zhu J. B., Zhou T., Liao Z. Y., Sun L., Chen R. Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behavior of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, Vol. 106, pp. 198—212. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.022
6. Еременко Н. М., Муравьева Ю. А., Применение методов рентгеновской микротомографии для определения пористости в керне скважин // Нефтегазовая геология. Теория и практика. — 2012. — № 3. — С. 1—12.
7. Галкин С. В., Ефимов А. А., Кривошеков С. Н., Савицкий Я. В., Черепанов С. С. Применение метода рентгеновской томографии при петрофизических исследованиях керна нефтяных и газовых месторождений // Геология и геофизика. — 2015. — № 5. — С. 995—1007.
8. Дробчак А.Н., Дуганов Г.А., Дучков А.А., Купер К.Э. Акустические измерения и рентгеновская томография песчаных образцов, содержащих гидрат ксенона // Геофизические технологии. -2019. -№4. -С. 17-23. DOI: 10.18303/2619-1563-2019-4-17
9. Галкин С.В., Колычев И.Ю., Савицкий Я.В. Возможности исследования гидрофобизации коллекторов комплексированием методами рентгеновской томографии керна и электрического каротажа // Геология и геофизика. -2019. -№ 10. -Т. 60 -С. 1496-1507 DOI: 10.15372/GiG2019094
10. Галунин А. А., Степанов Г. Д., Безруков В. И., Свобода П., Кравцов А. Н. Исследование внутренней структуры образцов диабазов с помощью оптико-акустической и компьютерной рентгеновской томографии // Горный

информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4-1. — С. 16—25. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_16.

11. Pratama Istiadi Guntoro, Yousef Ghorbani, Pierre-Henri Koch, Jan Rosenkran X-ray Microcomputed Tomography (μ CT) for Mineral Characterization: A Review of Data Analysis Methods // Minerals., -2019, -V. 9, -P. 183, DOI:10.3390/min9030183
12. Кравцов А., Иванов П. Н., Малинникова О. Н., Черепецкая Е. Б., Гапеев А. А. Исследование микроструктуры углей Печорского бассейна методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 6. — С. 56–65. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-56-65.
13. Al-Suwaidi, M.H. Application of Digital Core Description Methods in a Reservoir Characterisation Study: A Review of Traditional Versus Potential Future Methods / M.H. Al-Suwaidi, M.P. Williams, G. Ottinger // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Society of Petroleum Engineers. - 2010.
14. Alizadeh, S.M. An Analysis of Sleeve Effects for Petrophysical Measurements using Digital Core Analysis / S.M. Alizadeh, S. Latham, J. Middleton, T. Senden, C.H. Arns // International Petroleum Technology Conference. - Doha, Qatar. - 2015.
15. Andraa, H. Digital rock physics benchmarks—Part I: Imaging and segmentation / H. Andraa, N. Combaret, J. Dvorkin, E. Glatt, J. Han, M. Kabel, Y. Keehm, F. Krzkalla, M. Lee, C. Madonna, M. Marsh, T.M. Eric, H. Saenger, R. Sain, N. Saxena, S. Ricker, A. Wiegmann, X. Zhan // Computational Geosciences. — 2013. - Vol. 50. - P. 25-32.
16. Arns, C.H. Digital Core Laboratory: Reservoir core analysis from 3D images / C.H. Arns, H. Averdunk, F. Bauget, A. Sakellariou, T.J. Senden, A.P. Sheppard, R.M. Sok., W.V. Pinczewski, M.A. Knackstedt // 6th North America Rock Mechanical Symposium. - 2004.
17. Arns, C.H. Computation of linear elastic properties from micro-tomographic images: Methodology and agreement between theory and experiment / C.H. Arns, M.A. 111 Knackstedt, W.V. Pinczewski // Geophysics. — 2002. - Vol. 67, № 2. - P. 1396–1405.
18. Carpenter, C. Digital Core Analysis and Pore-Network Modeling in a Mature Field Project/ C. Carpenter // Journal of Petroleum Technology. — 2015. - Vol. 67, № 1.
19. Kalam, M.Z. Digital Rock Physics for Fast and Accurate Special Core Analysis in Carbonates / M.Z. Kalam // New Technologies in Oil and Gas Industry. Chapter 9. - 2012. - P. 201–226.
20. Knackstedt, M.A. Archie's exponents in complex lithologies derived from 3D 113 digital core analysis / M.A. Knackstedt, C.H. Arns, A.P. Sheppard, T.J.

- Senden, R.M. Sok, Y. Cinar, W.V. Pinczewski, M. Loannidis, G.S. Padhy // 48th Annual Logging Symposium, 2007. - 16 p.
21. Knackstedt, M.A. Digital Core Laboratory: Properties of reservoir core derived from 3D images / M.A. Knackstedt, C.H. Arns, A. Limaye, A. Sakellariou, T.J. Senden, A.P. Sheppard, R.M. Sok, W.V. Pinczewski, G.F. Bunn // SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management. Society of Petroleum Engineers, 2004. - 14 p.
22. Li, G.G. Rock Physical Properties Computed from Digital Core and Cuttings with Applications to Deep Gas Exploration and Development / G.G. Li, E. Diaz, A.M. Nur // SPE Deep Gas Conference and Exhibition, 2010. - 6 p.
23. Liu, X. Numerical simulation of rock electrical properties based on digital cores / X. Liu, J. Sun, H. Wang // Applied Geophysics. – 2009. - Vol. 6. № 1. - P. 1–7.
24. Passega, R. Texture as Characteristic of clastic Deposition / R. Passega // Petroleum Geology. – 1957. - Vol. 41, № 9.
25. Saenger, E.H. Finitedifference modeling of wave propagation on microscale: A snapshot of the work in progress / E.H. Saenger, R. Ciz, O.S. Kruger // Journal of Applied Geophysics. – 2007. - Vol. 72, №5.
26. Zheng, Y. The equivalence between digital core and rock physics model for pure sandstones and shaly sandstones / Y. Zheng, X. Yin, Z. Zong // SEG Technical 116 Program Expanded Abstracts, 2016.
27. Zhu, W. Progress of digital rock physics / W. Zhu, R. Shan // Oil Geophysical Prospecting. Vol. 49. № 6, 2014. - P. 1138–1146
28. Mavko, G. The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media. 2nd edition / G. Mavko, T. Mukerji, J. Dvorkin // Cambridge University Press, 2009. - 524 p.
29. Балашов, В.А. Прямое численное моделирование течений жидкости в поровом пространстве пород-коллекторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Балашов Владислав Александрович. - Москва, 2016. – 108 с.
30. Shandrygin, A.N. Digital Core Analysis for Flow Process Evaluation is Myth or Reality? / A.N. Shandrygin // SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. - 2014.
31. Бударин, В.А. Анализ некоторых допущений уравнения Навье-Стокса / В.А. Бударин // Problemele Energeticii Regionale. - 2010. - № 2 (13). - С. 59–65.
32. Сарваретдинов, Р.Г., Минуллин, А.Г., Махмутов, А.А., Галлямов, Р.И., Вышенская, М.И. Методика построения аналитической зависимости капиллярного давления смещения от ФЕС // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. - 2017. - Т. 10. - С. 34–40.

33. McGaughey, J. Geological Models, Rock Properties, and the 3D Inversion of Geophysical Data / J. McGaughey // *Advances in Geophysical Inversion and Modeling*. – 2015. – Vol. 10. – P. 473–483.
34. Гималтдинова, А.Ф. Оценка нефтенасыщенности по методике Леверетта / А.Ф. Гималтдинова, Г.А. Калмыков, Г.Г. Топунова // *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. – 2011. – № 4. – С. 71-74.
35. Pore-Scale Characterization of Carbonates Using X-Ray Microtomography / C.H. Arns, F. Bauget, A. Limaye, A. Sakellariou, T.J. Senden, A.P. Sheppard, R.M. Sok, W.V. Pinczewski, S. Bakke, L.I. Berge, P.T. Oren, M.A. Knackstedt // *The 2004 SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – Houston, Texas, the USA, 2004. – P. 1- 11.
36. Vinegar, H.J. X-Ray CT and NMR Imaging of Rocks / H.J. Vinegar // *Journal of Petroleum Technology*. – 1986. – Vol. 38. – P. 257-259.
37. Цифровой анализ керна: проблемы и перспективы / С.В. Степанов, Д.П. Патраков, В.В. Васильев, А.Б. Шабаров, А.В. Шаталов // *Нефтяное хозяйство*. – 2018. – № 2. – С. 18-22.
38. Цифровой керн – текущее состояние и перспективы развития технологии в ПАО «НК «Роснефть» / А.Н. Лазеев, Э.О. Тимашев, И.А. Вахрушева, М.Ф. Серкин, Я.И. Гильманов // *Нефтяное хозяйство*. – 2018. – № 11. – С. 18-22.
39. Жуковская, Е.А. Использование рентгеновской томографии при исследовании терригенных и карбонатных коллекторов / Е.А. Жуковская, Ю.М. Лопушняк // *Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть»*. – 2008. – № 1. – С. 25-27.
40. Костин, Д.К. Опыт ООО «ТННЦ» по изучению керна с помощью рентгеновского компьютерного томографа / Д.К. Костин, Е.Г. Кузнецов, А.П. Вилесов // *Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть»*. – 2014. – № 3. – С. 18-21.
41. Опыт исследования керна карбонатных отложений методом рентгеновской томографии / А.А. Ефимов, Я.В. Савицкий, С.В. Галкин, С.А. Шапиро // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2016. – Т. 15, №18. – С. 23–32.
42. Особенности изучения структуры пустотного пространства доманиковых отложений на основе томографических исследований / И.С. Закиров, Е.Ф. Захарова, Е.В. Орехов, Д.А. Аленькин, Д.И. Ганиев // *Сетевое научное издание «Нефтяная провинция»*. – 2019. – Т. 18, № 2. – С. 25-42.
43. Савицкий, Я.В. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании керна нефтяных и газовых месторождений / Я.В. Савицкий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2015. – № 15. – С. 28–37.

44. Применение метода рентгеновской томографии при петрофизических исследованиях керна нефтяных и газовых месторождений / С.В. Галкин, А.А. Ефимов, С.Н. Кривошеков, Я.В. Савицкий, С.С. Черепанов // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56, № 5. – С. 995-1007.
45. Применение компьютерной микротомографии для изучения строения терригенных коллекторов / Д.В. Корост, Г.А. Калмыков, В.О. Япаскерт, М.К. Иванов // Геология нефти и газа. – 2010. – № 2. – С. 36-42.
46. Карабутов А.А., Черепецкая Е.Б., Кравцов А.Н., Арригони М. Методы исследования структуры и свойств горных пород на образцах (краткий обзор). Горные науки и технологии. 2018; (4): 10-20. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2018-4-10-20>
47. Злобин, А.А. Теория и практика применения ядерного магнитного резонанса в физике нефтяного пласта / А.А. Злобин. – Пермь: Изд-во ПМ, 2015. – 271 с.
48. Кулявцев, А.В. Результаты опытно-промышленных работ по использованию ЯМР-релаксометра GeoSpec для измерения общей и эффективной пористости горных пород / А.В. Кулявцев, И.В. Федорцов // Нефтяное хозяйство. – 2017. – №9. – С. 34-36.
49. Оценка лиофильности пород бажендовской свиты методами адсорбции и ядерной магнитной релаксометрии / С.А. Борисенко, Н.Н. Богданович, Е.В. Козлова, М.Ю. Спасенных, Д.Е. Заграновская // Нефтяное хозяйство. – 2017. – №3. – С. 12-16.
50. Разницын, А.В. Комплексное определение петрофизических свойств продуктивных отложений методом ЯМР / А.В. Разницын, Н.А. Попов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2020. – Т. 19, № 2. – С. 132-139.
51. Шумская, М.И. Определение петрофизических параметров песчано-глинистых образцов керна и типизация пластовых флюидов методом ЯМР релаксометрии : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.10. – Новосибирск, 2017. – 136 с.
52. Эффективность применения метода ядерно-магнитного резонанса при лабораторных петрофизических исследованиях керна и шлама / В.А. Вавилин, А.А. Кунакасов, Т.Р. Галиев, Е.В. Сорокина // Нефтяное хозяйство. – 2011. – №8. – С. 21- 23.
53. Coates, G.R. NMR Logging. Principles and Applications / G.R. Coates, L. Xiao, M.G. Prammer. – Houston : Halliburton Energy Services, 1999. – 253 p.
54. Джафаров, И.С. Применение метода ЯМР для характеристики состава и распределения пластовых флюидов / И.С. Джафаров, П.Е. Сынгаевский, С.Ф. Хафизов. – Москва : Химия, 2002. – 439 с.

55. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция. Дефектоскопия, 1990, № 2, с. 29-41
56. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для повышения разрешающей способности изображения по эхосигналам // Акуст. журн. 2013. №2. С. 235-254. DOI: 10.1134/S1063771013020024.
57. Jobst M., Connolly G.D Demonstration of the Application of the Total Focusing Method to the Inspection of Steel Welds. - 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow, 2010, June 07-11.
58. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
59. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Возможности оценки характера несплошности металла ультразвуковым томографом с цифровой фокусировкой антенной решетки // Контроль. Диагностика. 2011. №10. С. 63-70.
60. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 2. Повышение отношения сигнал/шум // Контроль. Диагностика. 2015, № 7. (принята к печати).
61. Базулин Е.Г., Коколев С.А. Повышение отношения сигнал/шум при проведении ультразвукового контроля ремонтных заварок с использованием технологии прореженных антенных решёток // Дефектоскопия, 2013, №5, С. 45-58. DOI: 10.1134/S1061830913050021
62. Wallace Wai-Lok Lai, Xavier Dérobert, Peter Annan, A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis // NDT & E International, 2018, Vol. 96, pp. 58-78
63. Jun Zhang, Chao Zhang, Yaming Lu, Ting Zheng, Yunyi Jia, In-situ recognition of moisture damage in bridge deck asphalt pavement with time-frequency features of GPR signal // Construction and Building Materials, 2020, Vol. 24430, a. 118295
64. Agred K., Klysz G., Balayssac J. -P., Location of reinforcement and moisture assessment in reinforced concrete with a double receiver GPR antenna // Construction and Building Materials, 2018, Vol. 18810, pp. 1119-1127
65. Chen J.G., Haupt R.W., Buyukozturk O. Operational and defect parameters concerning the acoustic-laser vibrometry method for FRP-reinforced concrete. // NDT & E International, 2015, Vol. 71, pp. 43-53
66. Бычков, А.С., Черепецкая, Е.Б., Карабутов, А.А. и др. Improvement of Image Spatial Resolution in Optoacoustic Tomography with the Use of a Confocal Array // *Acoust. Phys.*, -2018. -V. 64, -P. 77–82. DOI: 10.1134/S1063771018010037

67. Bychkov A.S., Cherepetskaya E.B., Karabutov A.A., Makarov V.A., Laser optoacoustic tomography for the study of femtosecond laser filaments in air // *Laser Physics Letters*, 2016, Vol. 13, i. 8, № 085401
68. Kim J.E., Kim D.S., Ma P.S., Kim Y.Y., Multi-physics interpolation for the topology optimization of piezoelectric systems // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2010, Vol. 199, pp. 3153–3168
69. Zhai J., Zhao G., Shang L., Integrated design optimization of structural size and control system of piezoelectric curved shells with respect to sound radiation // *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, Vol. 6
70. Zhai S., Chen H., Ding C., Shen F., Luo C., Zhao X., Manipulation of transmitted wave front using ultrathin planar acoustic metasurfaces // *Applied Physics A*, 2015, Vol. 120(4), pp. 1283–1289
71. Gil Ho Y., Hyunggyu C., Shin H., Multiphysics topology optimization for piezoelectric acoustic focuser // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, Vol. 332, pp. 600–623
72. Friswell M.I., Mottershead J.E. *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1995, 286 p.
73. Mottershead J.E., Friswell M.I., Model updating in structural dynamics: a survey // *J. Sound Vib.*, 1993, Vol. 167, pp. 347–375
74. Липовко П.О., Логанчук М.Л. Компонентный анализ бинарных сред методом акустической рефлектоимпедансометрии // *Компьютерные исследования и моделирование*, - 2015, - т. 7, - № 2, - с. 301-313
75. И.Н. Жижимонтов, С.В. Степанов, А.В. Свалов «Применение стохастического порового-сетевого моделирования для получения уточненной зависимости пористость – абсолютная проницаемость на примере неокомских отложений месторождения Западной Сибири» // *Нефтяное хозяйство*, — 2017, — с.96 – 98.
76. Bilal Saad, Ardi Negara, Syed Shujath Ali, Digital Rock Physics Combined with Machine Learning for Rock Mechanical Properties Characterization // *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, 2018, doi: 10.2118/193269-MS
77. Liu G.R., Han X. *Computational Inverse Techniques in Nondestructive Evaluation* // CRC Press, Boca Raton, FL., 2003., 592 p.
78. Taheri H., Koester L. W., Bigelow T. A., Bond L. J. Thermoelastic finite element modeling of laser generated ultrasound in additive manufacturing materials. // *ASNT Annual Conference 2017*, 2017, pp. 188–198
79. Фаворская А.В. Исследование свойств материала пластины лазерным ультразвуком при помощи анализа кратных волн // *Компьютерные исследования и моделирование*, — 2019, — т. 11, — № 4, — С. 653-673

80. Sun H., Waisman H., Betti R. A sweeping window method for detection of flaws using an explicit dynamic XFEM and absorbing boundary layers // *Internat. J. Numer. Methods Engrg.*, 2016, Vol. 105, pp. 1014–1040
81. Gravenkamp H., Natarajan S., Dornisch W., On the use of NURBS-based discretizations in the scaled boundary finite element method for wave propagation problems // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2017, Vol. 315, pp. 867–880
82. Jung J., Jeong C., Taciroglu E. Identification of a scatterer embedded in elastic heterogeneous media using dynamic XFEM // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2013, Vol. 259, pp. 50–63
83. Звелто О. Принципы лазеров. — СПб.: Лань, 2008. — 720 с
84. Карабутов А.А., Макаров В.А., Шкуратник В.Л., Черепецкая Е.Б., Теоретическая оценка параметров ультразвуковых импульсов, возбуждаемых в геоматериалах лазерным излучением, ФТПРПИ, — 2003, — № 4, — с. 11-18.
85. Bradley E. Treeby. Acoustic attenuation compensation in photoacoustic tomography using time-variant filtering // *J. of Biomedical Optics*. -2013. -v. 18(3). -036008. DOI: 10.1117/1.JBO.18.3.036008
86. Карабутов А. А., Подымова Н.Б., Соколовская Ю.Г. Локальные соотношения Крамерса-Кронига для коэффициента затухания и фазовой скорости продольных ультразвуковых волн в полимерных композитах // *Акустический журнал*. -2019. -№ 2. -Т. 65 – С. 182-189
87. 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.
88. Pashkin A. I. Use of Abcd-Matrix Method For The Simulation of Laser-Ultrasonic Probing Pulse Propagation In A Layered Medium of The Optical-Acoustic Transducer. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, 684 - 1, 012025.
89. 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.
90. 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.
91. 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).

Приложение А. Листинг программы

```
import dill as pickle
import copy
import multiprocessing as mp
import numpy as np
import sympy as sp
from sympy.matrices import Matrix

from scipy.optimize import minimize
import matplotlib.pyplot as plt

"""
-----
Класс Среды - Хранит параметры среды
-----
"""

class element:
    def __init__(self, Name, c, rho, size, alpha):
        self.Name = Name          #Наименование-идентификатор среды
        self.c_v = c              # скорость звука м/с
        self.rho_v = rho          # плотность кг/м^3
        self.size_v = size        # размер м
        self.alpha_v = alpha      # коэффициент поглощения света

        self.d1_v = 43*1e-15 #10*1e-15    # а коэффициент затухания звука

        self.d2_v = 2.0          #2.1    # у степень частоты в затухании звука
```

```

self.c = sp.Symbol('c' + '_' + Name)      # скорость звука м/с
self.rho = sp.Symbol('rho' + '_' + Name)   # плотность кг/м^3
self.size = sp.Symbol('size' + '_' + Name) # размер м
self.alpha = sp.Symbol('alpha' + '_' + Name) # коэффициент поглощения
света

```

```

self.d1 = sp.Symbol('d1' + '_' + Name)
self.d2 = sp.Symbol('d2' + '_' + Name)

```

```

self.tuples = []
self.tuples.append((self.c, self.c_v))
self.tuples.append((self.rho, self.rho_v))
self.tuples.append((self.size, self.size_v))
self.tuples.append((self.alpha, self.alpha_v))

```

```

self.tuples.append((self.d1, self.d1_v))
self.tuples.append((self.d2, self.d2_v))

```

```

def Set_d1(self, x):
    self.tuples.pop(self.tuples.index((self.d1, self.d1_v)))
    self.tuples.append((self.d1, x))
def Set_d2(self, x):
    self.tuples.pop(self.tuples.index((self.d2, self.d2_v)))
    self.tuples.append((self.d2, x))

```

```

class layer:
    def __init__(self, Name, Elements, Weights, size):
        self.Name = Name

```

```

self.Elements = Elements
self.Weights_v = Weights
self.size_v = size

self.size = sp.Symbol('size' + '_' + Name)
self.Weights = []
self.tuples = []
self.tuples.append((self.size, self.size_v))
for i in range(0,len(Weights)):
    weight = sp.Symbol('weight'+ '_' + str(i) + '_' + Name)
    self.Weights.append(weight)
    self.tuples.append((weight, self.Weights_v[i]))

```

"""

Класс ABCD матрицы - Хранит параметры матрицы преобразований для конкретного сигнала

"""

```

class ABCD_Matrix:
    def __init__(self, Name):
        self.Name = Name #Наименование-идентификатор среды-сигнала
        self.mx_v = Matrix([[1.0, 0.0],[0.0, 1.0]])

        self.A = sp.Symbol('A' + '_' + Name)
        self.B = sp.Symbol('B' + '_' + Name)
        self.C = sp.Symbol('C' + '_' + Name)
        self.D = sp.Symbol('D' + '_' + Name)

```

```

self.tuples = []
self.tuples.append((self.A, self.A_v()))
self.tuples.append((self.B, self.B_v()))
self.tuples.append((self.C, self.C_v()))
self.tuples.append((self.D, self.D_v()))

```

```

def A_v(self):
    return self.mx_v[0,0]
def B_v(self):
    return self.mx_v[0,1]
def C_v(self):
    return self.mx_v[1,0]
def D_v(self):
    return self.mx_v[1,1]

```

```

def q_change(self, q):
    q = (self.A_v() * q + self.B_v()) / (self.C_v() * q + self.D_v())
    return q

```

"""

Класс Начальных параметров сигнала - Хранит общие начальные параметры
для генерируемых сигналов

"""

```

class Standard_Signal:

    P_0_v = 6.5

    Nt_v = 2**12#15#4096

    F_d_v = 100.0 * 1e6 #1e9          # частота дискретизации
    [Гц]

    tau_l_v = 7.0e-09

    c_g_v = 2700.0

    GB_R_v = np.Inf                  # R радиус кривизны гауссова
пучка >> бесконечности
    GB_r0_v = 3.8 * 1e-3

    tt_v = np.arange(Nt_v) / F_d_v
    Nf_v = int((Nt_v/2)+1) if Nt_v % 2 == 0 else int((Nt_v+1)/2)
    ff_v = np.arange(Nf_v) * (F_d_v / Nt_v)          # frequency series [Hz]

    P_0 = sp.Symbol('P_0')
    Nt = sp.Symbol('Nt')
    F_d = sp.Symbol('F_d')          #1e9 # частота дискретизации [Гц]
    tau_l = sp.Symbol('tau_l')      # длительность лазерного импульса [с]
    c_g = sp.Symbol('c_gen')

    GB_R = sp.Symbol('GB_R')        # R радиус кривизны гауссова пучка >>
бесконечности
    GB_r0 = sp.Symbol('GB_r0')      # [m] a0 начальный радиус пучка

    tt = sp.Symbol('tt')
    Nf = sp.Symbol('Nf')

```

```
ff = sp.Symbol('FreqDom')
```

```
ww = ff * 2 * np.pi          # circular frequency series [rad/s]
```

```
ww_v = ff_v * 2 * np.pi
```

```
qq = 1 / (1 / GB_R - (1j * 2 * c_g) / (GB_r0**2 * ww))
```

```
tuples = []
```

```
tuples.append((P_0, P_0_v))
```

```
tuples.append((Nt, Nt_v))
```

```
tuples.append((F_d, F_d_v))
```

```
tuples.append((tau_l, tau_l_v))
```

```
tuples.append((c_g, c_g_v))
```

```
tuples.append((GB_R, GB_R_v))
```

```
tuples.append((GB_r0, GB_r0_v))
```

```
tuples.append((Nf, Nf_v))
```

```
tuples.append((ff, ff_v))
```

```
"""
```

```
-----
```

Класс Сигнала - Хранит идентификатор конкретного сигнала и его преобразования относительно начального, а также ссылку на начальное положение сигнала.

```
-----
```

```
"""
```

```
class Signal:
```

```
    def __init__(self, Name, SS, Pf, Mx):
```

```
        self.Name = Name
```

```
self.Pf_v = Pf # np.zeros([SS.Nf,1]) # текущий спектр сигнала
```

```
self.Norm_coeff_P = 1.0
```

```
self.Norm_coeff_S = 1.0
```

```
self.ss = SS
```

```
self.Mx = Mx # ABCD_Matrix()
```

```
self.Calc_Tuples_list = SS.tuples
```

```
#-----Функции расчета коэффициентов-----
```

```
def k_damping(self, w, m): #1/m
```

```
    kk = w / m.c - m.d1 * w * np.abs(w)**(m.d2-1) * sp.tan(np.pi * m.d2 / 2) - 1j  
    * m.d1 * np.abs(w)**m.d2
```

```
    return kk
```

```
def K(self, w, N, w_a):
```

```
    return (1 / (N + 1)) * (1 + 1j * N * w / w_a) / (1 + (w / w_a)**2)
```

```
def K_tr(self, w, N, w_a):
```

```
    return (1 / (1 + 1j * w / w_a))/2
```

```
#-----Функции генерации сигнала-----
```

```
def generate_tr(self, m_g, m_tr):
```

```
    ePf = 0
```

```
    for i in range(0, len(m_g.Elements)):
```

```

for j in range(0, len(m_tr.Elements)):
    e_g = m_g.Elements[i]
    w_g = m_g.Weights[i]
    e_tr = m_tr.Elements[j]
    w_tr = m_tr.Weights[j]
    w_a = e_g.alpha * e_g.c
    N = (e_g.rho * e_g.c) / (e_tr.rho * e_tr.c)
    ePf = ePf + (1 / w_a) * self.K_tr(self.ss.ww, N, w_a) * w_g * w_tr
self.Pf = self.ss.P_0 * ePf * sp.exp(-self.ss.ww**2 * self.ss.tau_l**2 / 4)
return self

```

```

def generate_abs(self, m_g, m_tr):
    ePf = 0
    for i in range(0, len(m_g.Elements)):
        for j in range(0, len(m_tr.Elements)):
            e_g = m_g.Elements[i]
            w_g = m_g.Weights[i]
            e_tr = m_tr.Elements[j]
            w_tr = m_tr.Weights[j]
            w_a = e_g.alpha * e_g.c
            N = (e_g.rho * e_g.c) / (e_tr.rho * e_tr.c)
            ePf = ePf + (1 / w_a) * self.K(self.ss.ww, N, w_a) * w_g * w_tr
self.Pf = self.ss.P_0 * ePf * sp.exp(-self.ss.ww**2 * self.ss.tau_l**2 / 4)

return self

```

#-----Функции распространения сигнала-----

```

def reflect(self, m_1, m_2):

```

```

ePf = 0
for i in range(0, len(m_1.Elements)):
    for j in range(0, len(m_2.Elements)):
        e_1 = m_1.Elements[i]
        w_1 = m_1.Weights[i]
        e_2 = m_2.Elements[j]
        w_2 = m_2.Weights[j]
        N = (e_2.rho * e_2.c) / (e_1.rho * e_1.c)
        ePf = ePf + (w_1 * (N-1)/(N+1)) * w_2
self.Pf = self.Pf * ePf

```

```

return self

```

```

def transmit(self, m_1, m_2):
    ePf = 0
    eMx = Matrix([[0.0, 0.0],[0.0, 0.0]])
    for i in range(0, len(m_1.Elements)):
        for j in range(0, len(m_2.Elements)):
            e_1 = m_1.Elements[i]
            w_1 = m_1.Weights[i]
            e_2 = m_2.Elements[j]
            w_2 = m_2.Weights[j]
            N = (e_1.rho * e_1.c) / (e_2.rho * e_2.c)
            ePf = ePf + ( w_1 * (2*N/(N+1))) * w_2
            eMx = eMx + ( w_1 * Matrix([[1.0, 0.0],[0.0, e_2.c/e_1.c]])) *w_2

    self.Pf = self.Pf * ePf
    self.Mx.mx_v = self.Mx.mx_v * eMx

```

```
return self
```

```
def propagate(self, m):
```

```
    ePf = 0
```

```
    eMx = Matrix([[0.0, 0.0],[0.0, 0.0]])
```

```
    for i in range(0, len(m.Elements)):
```

```
        e = m.Elements[i]
```

```
        w = m.Weights[i]
```

```
        ePf = ePf + w * sp.exp(-1j * self.k_damping(self.ss.ww, e) * m.size)
```

```
        eMx = eMx + Matrix([[1.0, m.size],[0.0, 1.0]]) * w
```

```
    self.Pf = self.Pf * ePf
```

```
    self.Mx.mx_v = self.Mx.mx_v * eMx
```

```
    return self
```

```
def move(self, m):
```

```
    self.Pf = self.Pf * sp.exp(-1j * self.ss.ww * m.size/m.c)# - без затухания
```

```
    self.Mx.mx_v = self.Mx.mx_v * Matrix([[1.0, m.size],[0.0, 1.0]])
```

```
    self.Add_calc_tuples(m.tuples)
```

```
    return self
```

```
#-----Функции доступа к параметрам сигнала-----
```

```
def getPf_paraxial(self):
```

```
    coeff = self.ss.qq /(self.Mx.A_v() * self.ss.qq + self.Mx.B_v())
```

```
if (np.array_equal(self.Pf_v, np.zeros(self.ss.Nf_v) ) ):
```

```
    Pf = self.Pf * coeff
```

```
    Calc = self.Calc_Tuples_list
```

```
    Pf = str(Pf.subs(Calc))
```

```
    Pf = self.Str_replace(Pf, 'exp', 'np.exp')
```

```
    Pf = self.Str_replace(Pf, 'Abs', 'abs')
```

```
    Pf = self.Str_replace(Pf, 'I', '1j')
```

```
    Pf = self.Str_replace(Pf, 'FreqDom', 'self.ss.ff_v')
```

```
    Pf = np.array(eval(Pf))
```

```
else:
```

```
    Calc = self.Calc_Tuples_list
```

```
    coeff = str(coeff.subs(Calc))
```

```
    coeff = self.Str_replace(coeff, 'exp', 'np.exp')
```

```
    coeff = self.Str_replace(coeff, 'Abs', 'abs')
```

```
    coeff = self.Str_replace(coeff, 'I', '1j')
```

```
    coeff = self.Str_replace(coeff, 'FreqDom', 'self.ss.ff_v')
```

```
    coeff = eval(coeff)
```

```
    Pf = self.Pf_v * coeff
```

```
return Pf
```

```
def getPf_integrated(self):
```

```
    c = 2700.0
```

```
    d = 8
```

```
    coeff = self.ss.qq /(self.Mx.A_v() * self.ss.qq + self.Mx.B_v())
```

```
    q2 = self.Mx.q_change(self.ss.qq)
```

```
    S = (np.pi * d**2)/4
```

```
    ans_0 = -(2 * np.pi * q2 * c)/(1j * self.ss.ww)
```

```
    ans_r = sp.exp(-1j * (self.ss.ww/c) * (d/2)**2/ (2 * q2)) * (-(2 * np.pi * q2 *  
c)/(1j * self.ss.ww))
```

```
    ans = ans_r - ans_0
```

```
    ans = ans/S
```

```
    if (np.array_equal(self.Pf_v, np.zeros(self.ss.Nf_v) ) ):
```

```
        Pf = self.Pf * ans * coeff
```

```
        Calc = self.Calc_Tuples_list
```

```
        Pf = str(Pf.subs(Calc))
```

```
        Pf = self.Str_replace(Pf, 'exp', 'np.exp')
```

```
        Pf = self.Str_replace(Pf, 'Abs', 'abs')
```

```
        Pf = self.Str_replace(Pf, 'I', '1j')
```

```

Pf = self.Str_replace(Pf, 'FreqDom', 'self.ss.ff_v')

Pf = np.array(eval(Pf))

else:
    coeff = ans * coeff
    Calc = self.Calc_Tuples_list
    coeff = str(coeff.subs(Calc))

    coeff = self.Str_replace(coeff, 'exp', 'np.exp')
    coeff = self.Str_replace(coeff, 'Abs', 'abs')
    coeff = self.Str_replace(coeff, 'I', '1j')
    coeff = self.Str_replace(coeff, 'FreqDom', 'self.ss.ff_v')

    coeff = eval(coeff)
    Pf = self.Pf_v * coeff

return Pf

#-----Дополнительные функции-----
def Add_calc_tuples(self, tuples):
    for i in tuples:
        if(self.Calc_Tuples_list.count(i) == 0):
            self.Calc_Tuples_list.append(i)

    return 0

def Str_replace(self, String, SubToR, SubForR):

```

```

i = 0
while (i < len(String)) and (String[i:].find(SubToR) != -1):
    i = i + String[i:].find(SubToR)
    String = String[:i] + SubForR + String[i+len(SubToR):]
    i = i + len(SubForR)

return String

```

```

def getSelf_Norm_P(self):
    A = np.fft.irfft(self.getPf_paraxial(), axis=0) * self.ss.F_d_v
    c = np.amax(A)
    return c

```

```

def getSelf_Norm_S(self):
    A = abs(self.getPf_paraxial())
    c = np.amax(A)
    return c

```

```

def setNorm_coeffs(self, P, S):
    self.Norm_coeff_P = P
    self.Norm_coeff_S = S

    return 0

```

```

"""

```

Класс Модели - основного рабочего пространства

```

"""

```

```

class Model:
    Calc_tuples = []

    d = 4.0 * 1e-3 # mm sensor diameter
    ss = Standard_Signal()

    Layers_list = []
    Elements_list = [] #track list, consists of element structures
    MSignals_list = [] #list of signals to process
    MProcesses_list = []

    ModelE = 0
    EvalString = ""

    ModelFunc = 0

    def Modeling(self):
        SignalsCount = 0
        Minimal = 0.02
        RCount = 0
        maxRCount = 5

        Signal = self.NewSignal('Signal')
        self.MSignals_list.append(Signal)

    Signal.generate_tr(self.Layers_list[2],self.Layers_list[1]).transmit(self.Layers_list[
    2],self.Layers_list[1])

    SignalsCount += 1

```

```

        self.SignalPropagation(2, Signal, 0, Minimal, SignalsCount, RCount,
maxRCount)

```

```

        Signal = self.NewSignal('Signal')
        self.MSignals_list.append(Signal)

```

```

        Signal.generate_abs(self.Layers_list[2],self.Layers_list[1])
        SignalsCount += 1

```

```

        self.SignalPropagation(3, Signal, 1, Minimal, SignalsCount, RCount,
maxRCount)

```

```

        return 0

```

```

def PrepareModelString(self, ModelString):

```

```

    if(ModelString != 0):

```

```

        self.ModelE = ModelString

```

```

        return 0

```

```

    else:

```

```

        if(len(self.MSignals_list) != 0):

```

```

            Calc = []

```

```

            for i in self.MSignals_list:

```

```

                coeff = i.ss.qq /(i.Mx.A_v() * i.ss.qq + i.Mx.B_v())

```

```

                if (np.array_equal(i.Pf_v, np.zeros(i.ss.Nf_v) ) ):

```

```

                    Pf = i.Pf * coeff

```

```

                    self.ModelE = self.ModelE + Pf

```

```

        with open("Model.txt", "wb") as outf:

```

```

        pickle.dump(self.ModelE, outf)
        outf.close()
    return 0
else:
    return 1

def PrepareEvalString(self, Calc_Tuples):
    if(Calc_Tuples != 0):
        if(self.ModelE != 0):
            print("Start lambd")
            self.EvalString = str(self.ModelE.subs(Calc_Tuples))
            print("Tuples Ready")

            self.EvalString = self.Str_replace(self.EvalString, 'tan', 'np.tan')
            self.EvalString = self.Str_replace(self.EvalString, 'exp', 'np.exp')
            self.EvalString = self.Str_replace(self.EvalString, 'Abs', 'abs')
            self.EvalString = self.Str_replace(self.EvalString, 'T', '1j')

            executable = "lambda x: "+self.EvalString
            self.ModelFunc = eval(executable)

        with open("ModelFunc.txt", "wb") as outf:
            pickle.dump(self.ModelFunc, outf)
            outf.close()

    print("End lambd")

```

```

        return 0
    else:
        return 1
    else:
        with open("ModelFunc.txt", 'rb') as inf:
            self.ModelFunc = pickle.load(inf)
            inf.close()
            return 1
        return 0

def Evaluation(self,x):
    return self.ModelFunc(x)

def SignalPropagation(self, PosId, Signal, into, Minimal, SignalCount, RCount,
maxRCount):
    print(SignalCount)

    if (into == 1):
        while (PosId != (len(self.Layers_list)-2)*2):
            if (PosId%2 == 0):
                if (RCount < maxRCount-1):
                    Signal2 = self.NewSignal('2')
                    Signal2 = copy.deepcopy(Signal)

Signal2.reflect(self.Layers_list[int((PosId)/2)],self.Layers_list[int((PosId+2)/2)])

        SignalCount += 1
        self.MSignals_list.append(Signal2)

```

```
        self.SignalPropagation(PosId, Signal2, 0, Minimal, SignalCount,
                                RCount+1, maxRCount)
```

```
Signal.transmit(self.Layers_list[int((PosId)/2)],self.Layers_list[int((PosId+2)/2)])
```

```
    else:
```

```
        Signal.propagate(self.Layers_list[int((PosId+1)/2)])
```

```
        PosId = PosId+1
```

```
    if(PosId == (len(self.Layers_list)-2)*2):
```

```
Signal.reflect(self.Layers_list[int((PosId)/2)],self.Layers_list[int((PosId+2)/2)])
```

```
        self.SignalPropagation(PosId, Signal, 0, Minimal, SignalCount,
                                RCount+1, maxRCount)
```

```
    return 0
```

```
    else:
```

```
        while (PosId != 1):
```

```
            if (PosId%2 == 0):
```

```
                Signal.propagate(self.Layers_list[int(PosId/2)])
```

```
            else:
```

```
                if(RCount < maxRCount):
```

```
                    Signal2 = self.NewSignal('2')
```

```
                    Signal2 = copy.deepcopy(Signal)
```

```
Signal2.reflect(self.Layers_list[int((PosId+1)/2)],self.Layers_list[int((PosId-1)/2)])
```

```

        self.MSignals_list.append(Signal2)
        self.SignalPropagation(PosId, Signal2, 1, Minimal, SignalCount,
RCount+1, maxRCount)

Signal.transmit(self.Layers_list[int((PosId+1)/2)],self.Layers_list[int((PosId-1)/2)])

PosId = PosId-1

if(PosId == 1):
    if(RCount < maxRCount):
        Signal2 = self.NewSignal('2')
        Signal2 = copy.deepcopy(Signal)

        Signal2.reflect(self.Layers_list[int((PosId+1)/2)],self.Layers_list[0])

        self.MSignals_list.append(Signal2)
        self.SignalPropagation(PosId, Signal2, 1, Minimal, SignalCount,
RCount+1, maxRCount)

    return 0

def NewSignal(self, Name):
    Pf_v = np.zeros(self.ss.Nf_v)

    return self.CreateSignal(Pf_v, Name)

```

```

def CreateSignal(self, Pf_v, Name):
    Mx = ABCD_Matrix(Name)

    return Signal(Name, self.ss, Pf_v, Mx)

def Str_replace(self, String, SubToR, SubForR):
    i = 0
    while (i < len(String)) and (String[i:].find(SubToR) != -1):
        i = i + String[i:].find(SubToR)
        String = String[:i] + SubForR + String[i+len(SubToR):]
        i = i + len(SubForR)

    return String

def loadP(self, FileName):
    data = np.loadtxt(FileName)
    Pf_v = np.fft.rfft(data[:,1]/self.ss.F_d_v, axis=0)

    return self.CreateSignal(Pf_v, FileName)

def loadPfirst(self, FileName):
    data = np.loadtxt(FileName)

    data[500:4096] = data[500:4096]-data[500:4096]

    Pf_v = np.fft.rfft(data[:,1]/self.ss.F_d_v, axis=0)

    return self.CreateSignal(Pf_v, FileName)

```

```

def get_signal_WF(self, S):
    return (np.fft.irfft(S.getPf_paraxial(), axis=0) * self.ss.F_d_v)

def Plot_Paraxial(self, A, lbl, formatS = '-'):
    plt.plot(A.ss.tt_v * 1e6, self.get_signal_WF(A), formatS, label = lbl)
    #A.getWF_paraxial(), label = lbl)

    return 0

def Plot_Paraxial_Norm(self, A, lbl, formatS = '-'):
    X= self.get_signal_WF(A)
    X = X/(A.Norm_coeff_P)

    plt.plot(A.ss.tt_v * 1e6, X ,formatS, label = lbl) #A.getWF_paraxial(), label =
    lbl)
    return 0

def Plot_ParSumm(self, A, B, lbl):
    C = self.NewSignal('C')
    C.Pf_v = A.getPf_paraxial() + B.getPf_paraxial()
    plt.plot(C.ss.tt_v * 1e6, self.get_signal_WF(C), label =
    lbl)#C.getWF_paraxial(), label = lbl)
    return 0

def Plot_IntSumm(self, A, B, lbl):
    C = self.NewSignal()
    C.Pf = A.getPf_integrated(self.d) + B.getPf_integrated(self.d)
    plt.plot(C.ss.tt * 1e6, self.get_signal_WF(C), label = lbl)#
    C.getWF_paraxial(), label = lbl)

```

```
return 0
```

```
def Plot_SpecSumm(self, A, B, lbl):  
    C = self.NewSignal('C')  
    C.Pf_v = A.getPf_paraxial() + B.getPf_paraxial()  
    Z = abs(C.getPf_paraxial())  
    plt.plot(C.ss.ff_v, Z, label = lbl)  
    return 0
```

```
def Plot_Spec_Norm(self, A, lbl, formatS = '-'):   
    Z = abs(A.getPf_paraxial())  
    Z = Z/A.Norm_coeff_S  
  
    plt.plot(A.ss.ff_v/1e6, Z, formatS, label = lbl)  
    return 0
```

```
def Plot_Spec(self, A, lbl, formatS = '-'):   
    Z = abs(A.getPf_paraxial())  
  
    plt.plot(A.ss.ff_v/1e6, Z*A.ss.F_d_v/2, formatS, label = lbl)  
    return 0
```

```
def SignalSumm(self, A, B):  
    A.Pf_v = A.Pf_v + B.getPf_paraxial()  
    return 0
```

```
def PreparePlotP(self):  
    plt.figure()
```

```
plt.ylabel('Амплитуда, В.')
plt.legend(loc='upper left')
```

```
plt.xlabel('Время, мкс')
plt.ylim([-0.5, 0.5])
plt.xlim([3,20])
```

```
plt.grid()
```

```
def PreparePlotS(self):
    plt.figure()
    plt.ylabel('Амплитуда, В.')
    plt.legend(loc='upper left')
```

```
plt.xlabel('Время, мкс')
plt.ylim([-1.2, 1.2])
    ([-0.2, 1.2])
plt.xlim([3,4.5])
plt.grid()
```

```
"""
```

Создание объектов сред, модели и имитируемых сигналов

```
"""
```

```
gen = element('gen', 2700.0, 980.0, 3.5e-04, 1.35e+04)
gen.Set_d1(10.6353591e-20)
```

```
gen.Set_d2(2.79)
```

```
prism = element('prism', 2750.0, 1190.0, 1.10501209e-02, 50.0*1e2)
```

```
prism.Set_d1(4.40887773e-14)
```

```
prism.Set_d2(1.89224707e+00)
```

```
sensor = element('sensor', 1950.0, 1780.0, 1.0*1e-3, 50.0*1e2)
```

```
alum = element('alum', 6400.0, 2698.0, 2.0*1e-3, 50.0*1e2)
```

```
steel = element('steel', 5740.0, 7700.0, 2.0*1e-3, 50.0*1e2) #z 54643510 r*c n  
0.895
```

```
air = element('air', 333.0, 1.293, 0.001*1e-3, 50.0*1e2)
```

```
steelair = element('steelair', 3036.5, 3850.0 , 1*1e-3, 50.0*1e2)
```

```
alum1 = element('alum', 7000.0, 2900.0, 2.0*1e-3, 50.0*1e2)
```

```
steel1 = element('steel', 5500.0, 7528.0, 2.0*1e-3, 50.0*1e2)
```

```
steelair1 = element('steelair', 3200.5, 4000.0 , 1*1e-3, 50.0*1e2)
```

```
argillite = element('Argillite', 5037.36718424, 0.7330779e+03, 3.2*1e-3,  
50.0*1e2)
```

```
argillite.Set_d1(1.2082391e-8)
```

```
argillite.Set_d2(1.26586701e+00)
```

```
arg1 = element('arg1', 5037.36718424, 2.3e+03, 3.4*1e-3, 50.0*1e2)
```

```
arg1.Set_d1(1.0082391e-8)
```

```
arg1.Set_d2(1.26586701e+00)
```

```
arg2 = element('arg2', 4837.36718424, 1.5e+03, 3.3*1e-3, 50.0*1e2)
arg2.Set_d1(1.0082391e-8)
arg2.Set_d2(1.26586701e+00)
```

```
water = element('water', 1500.0, 750, 0.0042*1e-3, 50.0*1e2)
water.Set_d1(60.6353591e-19)
water.Set_d2(2.79)
```

```
glue = element('glue', 3000.0, 0.500e+03, 0.1*1e-3, 50.0*1e2)
glue.Set_d1(60.6353591e-21)
glue.Set_d2(2.79)
```

```
marble = element('Marble', 6254.48185989, 1680.0, 3.795*1e-3, 50.0*1e2)
marble.Set_d1(80.0082391e-21)
marble.Set_d2(2.46586701e+00) #1.92158518e+00 #2.06586701e+00
```

```
*****
```

Моделирование генерации и распространения сигнала

```
*****
```

```
M = Model()
M.Elements_list.append(sensor)
M.Elements_list.append(prism)
M.Elements_list.append(gen)
```

M.Elements_list.append(arg1)

M.Elements_list.append(glue)

M.Elements_list.append(arg2)

M.Elements_list.append(air)

M.Layers_list.append(layer("0",[sensor],[1.0],1.0*1e-3))

M.Layers_list.append(layer("1",[prism],[1.0],1.10501209e-02))

M.Layers_list.append(layer("2",[gen],[1.0],3.5e-04))

M.Layers_list.append(layer("3",[arg1,water],[0.5,0.5],10*1e-3))#0.0042*1e-3))

M.Layers_list.append(layer("4",[arg1],[1.0],3.4*1e-3))

M.Layers_list.append(layer("5",[arg1,glue],[0.8,0.2],0.1*1e-3))

M.Layers_list.append(layer("6",[glue],[1.0],0.1*1e-3))

M.Layers_list.append(layer("7",[arg2],[1.0],3.3*1e-3))

M.Layers_list.append(layer("8",[air],[1.0],1.0*1e-3))

''''''

Загрузка сохраненных сигналов

''''''

```
pmma = M.loadP("pmma_#37.txt")
f_s = M.loadPfirst("free_surface_#37.txt")
steel = M.loadPfirst("steel_#37.txt")
cfrp = M.loadP("cfrp_#37.txt")
r_g = M.loadP("red_glass_#37.txt")

newSensor = M.loadP("Sensor_17_03_22.txt")#("New_Sensor.txt")
ArgiliteCrack = ("Argilite_crack.txt")
Argil_b = M.loadP("Argil(b).txt")
Marble = M.loadP("Marble2.txt")

Test1 = M.loadP("Marble_Argil.txt")
Test2 = M.loadP("Marble_Argil_Marble.txt")

ArgNC = M.loadP("2_Argile_17_03_22_NoCrack0000.txt")
ArgC = M.loadP("2_Argile_17_03_22_Crack0000.txt")

X = M.NewSignal('Model')
Calc = []
for i in X.Calc_Tuples_list:
    if Calc.count(i) == 0:
        Calc.append(i)
```

```

for i in gen.tuples:
    if Calc.count(i) == 0:
        Calc.append(i)
for i in prism.tuples:
    if Calc.count(i) == 0:
        Calc.append(i)
for i in sensor.tuples:
    if Calc.count(i) == 0:
        Calc.append(i)
for i in air.tuples:
    if Calc.count(i) == 0:
        Calc.append(i)
for i in argillite.tuples:
    if Calc.count(i) == 0:
        Calc.append(i)
for i in marble.tuples:
    if Calc.count(i) == 0:
        Calc.append(i)
for i in water.tuples:
    if Calc.count(i) == 0:
        Calc.append(i)
for i in glue.tuples:
    if Calc.count(i) == 0:
        Calc.append(i)
for i in arg1.tuples:
    if Calc.count(i) == 0:
        Calc.append(i)
for i in arg2.tuples:

```

```

    if Calc.count(i) == 0:
        Calc.append(i)
for i in M.Layers_list:
    for j in i.tuples:
        if Calc.count(j) == 0:
            Calc.append(j)

Calc2 = []
ValList = []
vals = []
for i in range (0,len(Calc)):
    val = sp.Symbol("x["+str(i)+"]")
    Calc2.append((Calc[i][0],val))
    ValList.append(val)
    vals.append(Calc[i][1])

```

M.PrepareEvalString(0)

''''''

подготовка функции для минимизации

''''''

def optima(x):

evalVals = []

```

for i in range (0,len(Calc2)):
    if(Calc2[i][0]==sp.Symbol('GB_r0')):
        evalVals.append(x[0])
    elif(Calc2[i][0]==sp.Symbol('alpha_gen')):
        evalVals.append(x[1])
    else:
        evalVals.append(vals[i])

```

```

Pf0 = M.Evaluation(evalVals)

```

```

Pf0[0]= 0+0j

```

```

Pfr = newSensor.Pf_v

```

```

Answ = np.sum(np.abs(Pf0-Pfr)/np.abs(Pfr))

```

```

print(Answ)

```

```

return Answ

```

```

initVals =[M.ss.GB_r0_v,gen.alpha_v]

```

```

res = minimize(optima, initVals, method='Nelder-Mead', tol=1e-6)

```

```

Pf0 = M.Evaluation(vals)

```

```

Pf0[0]= 0+0j

```

```

X = M.NewSignal('Model')

```

```

X.Pf_v = Pf0

```

''''''

Подготовка и отображение графиков

''''''

M.PreparePlotP()

M.Plot_Paraxial(X, 'Model')

M.Plot_Paraxial(ArgC, 'Sensor')

N = len(M.Layers_list) - 2

pos = 0

fig, ax = plt.subplots()

plt.xlabel('Толщина, мм')

for i in range(N+1):

 x1 = M.Layers_list[i+1].size_v/100

 x = [pos,pos, pos+x1,pos+x1]

 y = [0,8,8,0]

 pos = pos + x1

 ax.fill(x, y)