

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

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

*На правах рукописи*

**Шибает Иван Александрович**

**Разработка и обоснование метода определения динамических модулей  
упругости образцов горных пород с применением лазерной ультразвуковой  
диагностики**

Специальность 25.00.16

«Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,  
маркшейдерское дело и геометрия недр»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., профессор,  
Черепецкая Е.Б.

Москва, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
Глава 1. Анализ методов определения модулей упругости образцов горных пород .....	10
1.1 Актуальность исследуемого направления .....	10
1.2 Разрушающие статические методы определения модулей упругости образцов горных пород .....	15
1.3 Полуразрушающие методы определения упругих свойств .....	17
1.3.1 Полевые полуразрушающие экспресс-методы .....	17
1.3.2 Определение упругих характеристик образцов малых размеров горных пород с помощью нано и микроиндексирования.....	18
1.4 Неразрушающие динамические методы определения модулей упругости образцов горных пород .....	19
1.4.1 Определение упругих свойств с помощью рентгеновской компьютерной томографии .....	20
1.4.2 Ультразвуковые исследования, стандартные методики ГОСТ, ASTM .....	21
1.4.3 Методы определения скоростей волн в образцах горных пород и расчёт на их основе динамических модулей упругости.....	24
1.4.4 Сканирующая акустическая микроскопия .....	26
1.4.5 Лазерная ультразвуковая диагностика гетерогенных сред.....	28
1.5 Выводы, постановка цели и задач исследования.....	29
Глава 2. Теоретическое обоснование генерации упругой сдвиговой волны, возникающей на границах раздела «изотропное твердое тело-образец» и «образец-воздух». Эхо-режим лазерной ультразвуковой диагностики. ....	33
2.1 Теоретические оценки параметров продольных и сдвиговых волн, возникающих на границе раздела двух изотропных сред и границе раздела «геоматериал-воздух» .....	33
2.2 Вывод аналитических выражений для построения временной формы сигнала.....	42
2.3 Разработка алгоритма расчёта временной формы сигнала на основе аналитических выражений .....	48
2.4 Верификация модельного сигнала, построенного с помощью оптимизационного алгоритма, в COMSOL Multiphysics .....	50
2.5 Выводы. ....	58
Глава 3. Разработка метода определения динамических модулей упругости модельных образцов на основе разработанного оптимизационного алгоритма расчёта скоростей упругих волн .....	59
3.1 Апробация оптимизационного алгоритма на модельных образцах.....	59
3.1.1 Подготовка модельных образцов .....	59
3.1.2 Определение динамических модулей упругости модельных образцов с помощью эхо-метода и оптимизационного эхо-метода.....	61
3.2 Теневой иммерсионный режим лазерной ультразвуковой диагностики с применением установки Геоскан-02МУ.....	65
3.2.1 Автоматизация установки Геоскан-02МУ для проведения массовых испытаний .....	68

3.2.2	Разработка алгоритма работы с установкой Геоскан-02МУ .....	69
3.3	Дополнительная верификация значений скоростей распространения волн в модельных образцах различными методами лазерной ультразвуковой диагностики.....	75
3.4	Пример определения динамических модулей упругости на образце-пластине известняка с помощью оптимизационного эхо-метода.....	80
3.5	Выводы .....	82
Глава 4. Установление оптимальных параметров и режимов работы лазерной ультразвуковой диагностики для определения динамических модулей упругости разномасштабных образцов горных пород различных генотипов.....		
4.1	Подготовка образцов горных пород.....	83
4.2	Подготовка аншлифов для оценки минерального состава образцов и их структуры .....	86
4.2.1	Оценка структурных особенностей с помощью РЭМ Phenom ProX .....	87
4.3	Исследование полноразмерных образцов горных пород с помощью теневого режима работы лазерной ультразвуковой диагностики .....	90
4.3.1	Измерение скорости упругой продольной волны в воде в кювете установки Геоскан-02МУ .....	90
4.4	Исследование образцов-пластин горных пород, подготовленных из полноразмерных образцов, с помощью эхо-методов лазерной ультразвуковой диагностики по групповым скоростям.....	92
4.4.1	Определение минимальной допустимой толщины образца-пластины для определения динамического модуля упругости .....	92
4.4.2	Критерии оценки качества временной формы ультразвукового сигнала ..	94
4.4.3	Сравнительный анализ групповых скоростей волн в образцах горных пород, полученных разными методами .....	96
4.5	Исследование разномасштабных образцов горных пород с помощью теневого метода лазерной ультразвуковой диагностики по фазовым скоростям .....	99
4.5.1	Оценка частотного диапазона для построения дисперсионных кривых ..	100
4.5.2	Алгоритм расчёта дисперсионных кривых фазовой скорости упругих волн в разномасштабных образцах горных пород.....	102
4.6	Сравнение групповых и фазовых скоростей упругих волн разномасштабных образцов горных пород.....	107
4.6.1	Временные поправки для теневого метода, необходимые для корректного сравнения с результатами оптимизационного метода .....	108
4.7	Анализ рассчитанных динамических модулей упругости разномасштабных образцов горных пород различных генотипов .....	113
4.8	Выводы .....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....		
Основные положения и результаты диссертационного исследования.....		123
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....		125
Приложение А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ .....		136
Приложение Б. Общая таблица свойств образцов горных пород .....		137
Приложение В. Временные формы сигналов .....		141

Приложение Г. Временные карты распределения амплитуды импульсов различных волн от угла поворота образца. ....	150
Приложение Д. Дисперсионные зависимости «скорость продольной волны- частота» .....	154
Приложение Е. Разработанная методика определения динамических модулей упругости разномасштабных образцов горных пород .....	163

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность работы.**

Определение напряженно-деформированного состояния массива горных пород, расчёты устойчивости стволов скважин, оценка зоны влияния выработок на массив горных пород и др. являются актуальными задачами горного и нефтегазового производства. Для решения данных задач необходимо знать значения физико-механических характеристик, полученных при исследовании образцов геоматериалов.

Как известно, керн является лучшим источником прямой геологической информации о составе и физико-механических свойствах горных пород, и даже разрушенные его части несут ценную информацию о геоматериале. В большинстве случаев одними из важнейших параметров являются модули упругости, полученные разрушающими методами при механических испытаниях в результате интерпретации зависимостей напряжения от деформации. Определяемые таким методом модули называют статическими.

Важно заметить, что не всегда удастся определить модули упругости статическим методом ввиду ограниченного количества геологического материала в виде исходного керна. Тогда используют неразрушающие акустические методы, в которых по измеренным скоростям упругих волн различных типов рассчитывают так называемые динамические модули упругости. Однако при определении скоростей продольных, сдвиговых и поверхностных волн стандартными ультразвуковыми методами с использованием пьезоэлектрических преобразователей приводит к существенной погрешности при нахождении их значений. Более того, данные методы не позволяют исследовать образцы малых размеров. Поэтому актуальной является задача прецизионного определения скоростей продольных и сдвиговых волн для дальнейшего расчёта динамических модулей упругости.

Диссертационные исследования выполнены в рамках проектов РФФИ №19-35-90063 «Исследование динамики поврежденности геоматериалов под влиянием механических воздействий на основе комплекса ультразвуковых методов

геоконтроля», гранта РФФИ № 16-17-10181 «Диагностика структуры и свойств горных пород различного метаморфизма на основе усовершенствованной лазерно-ультразвуковой томографии для создания ресурсосберегающих технологий их переработки», грантов НИТУ МИСиС К2-2017-003 «Лазерно-ультразвуковая, терагерцовая и поляризационная спектроскопия гетерогенных сред», К2-2019-004 «Разработка комплекса интроскопических методов для исследования гетерогенных сред и численное моделирование на их основе поведения геоматериалов на различных масштабных уровнях при воздействии физических полей» и К2-2020-034 «Установление взаимосвязей статических и динамических параметров горных пород различных генотипов с помощью лазерной ультразвуковой диагностики».

**Целью диссертационной работы** является разработка и обоснование высокоточного комплексного лазерно-ультразвукового метода определения динамических модулей упругости разномасштабных образцов горных пород.

**Идея работы** заключается в установлении закономерностей генерации и распространения упругих волн различных типов, возникающих при нормальном падении гауссовых пучков продольных волн на границы раздела «твердое тело – геоматериал», для расчёта динамических модулей упругости геоматериала на основе прецизионного измерения скоростей этих волн.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ методов определения модулей упругости образцов горных пород;
2. Обосновать генерацию упругой сдвиговой акустической волны при нормальном падении ультразвуковых пучков с гауссовым распределением амплитуды по поперечному сечению на границы раздела «изотропное твердое тело-образец» и «образец-воздух» в эхо-режиме лазерной ультразвуковой диагностики;
3. Разработать аналитическую модель для расчёта временных форм акустических сигналов, учитывающую возникновение сдвиговых волн на границах раздела «изотропное твердое тело-образец» и «образец-воздух» и верифицировать ее;

4. Разработать оптимизационный алгоритм расчёта значений скоростей упругих волн на основе модельной временной формы сигнала, провести его верификацию и апробацию на модельных образцах;
5. Провести испытания разномасштабных образцов горных пород различного генотипа для определения динамических модулей упругости с помощью оптимизационного алгоритма и использованием комплексного метода лазерной ультразвуковой диагностики;
6. Разработать методику определения динамических модулей упругости на основе прецизионного измерения скоростей упругих волн комплексным методом лазерной ультразвуковой диагностики.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. При нормальном падении из изотропного твердого тела акустической продольной волны с гауссовым распределением амплитуды смещения частиц по поперечному сечению пучка на плоскую границу раздела «твердое тело-образец» и параллельную ей границу раздела «образец-воздух» возникают две сдвиговые волны: первая – в результате трансформации на первой границе, вторая – при отражении продольной волны от границы раздела «образец-воздух». Две данные волны приходят в одну и ту же точку синфазно с одинаковыми амплитудами;

2. Полученные аналитические выражения для временных профилей упругих волн различных типов и разработанный на их основе оптимизационный алгоритм расчёта скоростей в образцах изотропных твердых тел, включая геоматериалы, малых размеров (толщиной 3-20 мм) позволили определять скорость ультразвуковых волн с погрешностью не более 1,5% при использовании эхо-режима лазерной ультразвуковой диагностики;

3. Установлено, что при использовании эхо- и теневого методов лазерно-ультразвуковой диагностики в частотном диапазоне 100 – 500 кГц разброс фазовых скоростей упругих волн в образцах горных пород различных генотипов составляет более 15%, а в диапазоне 0,5 – 3 МГц данный разброс менее 1%, при этом значения фазовой и групповой скоростей совпадают, что позволяет рассчитывать динамические модули упругости геоматериалов с погрешностью не более 2%.

**Методы исследований** предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач, а именно: анализ современного состояния исследований в рассматриваемой области, проведение лабораторных экспериментов с использованием установок лазерной ультразвуковой диагностики (далее ЛУД), проведение теоретических расчётов с использованием Фурье-анализа и численного моделирования на основе Comsol Multiphysics для интерпретации полученных результатов и обоснования установленных закономерностей, а также статистическую обработку данных с использованием современного программного обеспечения.

**Научная новизна работы** состоит в теоретическом обосновании генерации сдвиговой волны при нормальном падении на границы раздела твердых тел импульса продольной волны с гауссовым распределением давления в поперечном сечении и создании на этой основе алгоритма расчёта скоростей упругих волн с последующим восстановлением по ним динамических упругих модулей.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке *"Методики определения динамических модулей упругости разномасштабных образцов горных пород с использованием комплексного метода лазерной ультразвуковой диагностики"*, а также в модернизации аппаратного и программного обеспечения для ее реализации. Внедрение данной методики позволит значительно оптимизировать проведение испытаний по определению динамических модулей упругости образцов горных пород.

**Апробация работы:** результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях и симпозиумах: всероссийской конференции «Дальние горизонты науки» (07-08.12.2017, Санкт-Петербург, Россия), международном научном симпозиуме «Неделя Горняка 2018» (31.01-02.02.2018, Москва, Россия), международной конференции «Efficiency and Sustainability in the Mineral Resources Industry. Geology, Mining, Processing, Economics, Safety and Environmental Management» (06-08.06.2018, Фрайберг, Германия), международной конференции «Актуальные проблемы недропользования» (13-17.05.2019, Санкт-Петербург, Россия), международной конференции «Innovations in Geology, Mining, Processing, Economics, Safety and

Environmental Management» (05 – 07.06.2019, Фрайберг, Германия), международном научном симпозиуме «Неделя Горняка 2020» (29.01-30.01.2020, Москва, Россия), XVIII Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Проблемы недропользования» (15-17.04.2020, Санкт-Петербург, Россия), XIX Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Проблемы недропользования» (14-16.04.2021, Санкт-Петербург, Россия), XVII Международном форум-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (31.05-06.06.2021, Санкт-Петербург, Россия), Всемирном конкурсе докладов молодых ученых YPLC 2021 (30 июня 2021, ИОМЗ, Великобритания, онлайн).

**Публикации по теме диссертации.** По теме исследования опубликовано 9 научных работ из них 8 в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ и индексируемых наукометрическими базами Scopus и Web of Science. Получены 1 патент РФ и свидетельство о регистрации программы ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и 6 приложений, содержит 86 рисунка, 25 таблиц, список литературы из 138 источника.

#### **Благодарности.**

Автор выражает особую благодарность научному руководителю Черепецкой Елене Борисовне за постоянное внимание, менторство и к.ф.-м.н. Бычкову Антону Сергеевичу за ценные советы и помощь при решении задач диссертационного исследования. В том числе автор благодарен сотрудникам лаборатории ЛУМИИ НИТУ «МИСиС» за сотрудничество и помощь в проведении исследований. Автор глубоко признателен зав. каф. ФизГео – Винникову Владимиру Александровичу за ценные советы и замечания, полученные в ходе написания и обсуждения работы.

Также автор благодарен своей родной сестре Кулик Марии Александровне за поддержку на протяжении всего пути обучения в аспирантуре.

Диссертационное исследование выполнено в рамках проекта РФФИ № 19-35-90063.

# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

## 1.1 Актуальность исследуемого направления

Большинство процессов горного и нефтегазового производства невозможно описать без знания физико-механических свойств (ФМС) горных пород, к которым относятся плотностные, механические, тепловые, электрические, магнитные, волновые, радиационные, гидрогазодинамические и горно-технологические. Среди них базовыми являются плотностные, механические, тепловые и электромагнитные свойства. Определение базовых свойств является обязательным, так как они служат фундаментом для дальнейших расчётов поведения массива горных пород на всех стадиях горного производства [1].

Таблица 1.1 - Базовые физико-механические параметры горных пород

Свойства	Основные параметры	Обозначение	Единицы измерения	Определение
Плотностные	Плотность	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	Масса единицы объема сухой горной породы с естественной ненарушенной структурой (с порами, трещинами и т.д.)
	Пористость	P	%	Относительный объем всех пор, заключенных в единице объема породы
Механические	Предел прочности при сжатии	$\sigma_{сж}$	Па	Критическое значение одноосного сжимающего напряжения, при котором происходит разрушение породы
	Предел прочности при растяжении	$\sigma_p$	Па	Критическое значение одноосного растягивающего напряжения, при котором происходит разрушение породы
	Модуль продольной упругости (Модуль Юнга)	E	Па	Коэффициент пропорциональности между действующим нормальным напряжением и соответствующей ему продольной упругой деформацией
	Коэффициент Пуассона	$\nu$	—	Коэффициент пропорциональности между упругими продольными и поперечными деформациями при одноосной нормальной нагрузке (отношение относительных поперечных деформаций к продольным)
Тепловые	Коэффициент	$\lambda$	Вт/(м·К)	Количество тепла, проходящего в единицу времени через единицу сечения

Свойства	Основные параметры	Обозначение	Единицы измерения	Определение
	теплопроводности			в направлении, перпендикулярном к сечению при перепаде температур, равном 1 К, на единицу расстояния
	Удельная теплоемкость	c	Дж/(кг·К)	Количество тепла, необходимое для повышения температуры 1 кг вещества на 1 К
	Коэффициент линейного расширения	$\alpha$	К <sup>-1</sup>	Относительное удлинение тела при нагреве его на 1 К
Электромагнитные	Удельное электрическое сопротивление	$\rho$	Ом·м	Величина, обратная силе тока, проходящего через 1 м <sup>2</sup> площади образца при напряженности электрического поля в образце, равной 1 В/м
	Относительная диэлектрическая проницаемость	$\epsilon$	–	Коэффициент, показывающий, во сколько раз уменьшается напряженность электрического поля при внесении в него породы
	Относительная магнитная проницаемость	$\mu$	–	Коэффициент, показывающий, во сколько раз магнитная индукция поля изменяется при перемещении в него образца по сравнению с полем в вакууме

К базовым отнесены 12 элементарных, исходных и независимых физических параметров, позволяющих вычислять максимальное количество других характеристик пород [2].

Методы определения прочностных и деформационных характеристик горных пород разделяют на прямые (включающие лабораторные и натурные эксперименты) [3-11] и косвенные (аналитические, эмпирические и численные) [12-18].

Обычно данные параметры определяют на образцах, которые подготовлены из кернов буровых скважин или отобранных кусков породы. Важным условием является отбор проб непосредственно у исследуемого участка, если это невозможно, тогда в местах выработок, которые соответствуют тем же стратиграфическим горизонтам. Отклонение от выполнения данных условий влечет снижение или вообще потерю представительности отбираемых проб, что в дальнейшем приводит к искажению результатов, определяемых ФМС [19].

Также важно отметить, что разработанные методики геомеханического документирования керна строго регламентируют порядок описания керна в следующей последовательности [20]:

- определение показателей извлечения керна и частоты его естественных трещин с фиксированием их ориентации;
- передача керна на место документирования с последующей фотофиксацией, описанием породы;
- описание разрывных нарушений (и прочих нарушений однородности), определение ориентации этих нарушений);
- проведение экспресс-анализов физико-механических свойств (в основном это – определение предела прочности при сжатии для ненарушенного керна).

Основными параметрами извлечения керна являются общий выход керна (TCR), показатель извлечения цельного керна (SCR), показатель качества породы (RQD). TCR определяется процентным отношением длины извлеченного керна (включая как цельный (сплошной), так и разрушенный (обломочный)) к общей длине кернового бурового рейса, SCR – это процентное отношение суммарной длины извлеченного керна в виде сплошных (цельных) цилиндров к длине бурового рейса, а RQD определяется как процентное отношение суммарной длины сплошных (цельных) цилиндров извлеченного керна длиной более 100 мм каждый между естественными трещинами к длине бурового рейса

Данный алгоритм оправдывает трудозатраты из-за минимизации возможных последующих ошибок с описанием текстурно-структурных особенностей геологического материала и его ориентированно важных параметров (для корректного представления состояния породного массива на глубине).

В рамках решения современных задач геомеханики особенно важным является определение упругих характеристик образцов горных пород: определение модулей упругости и деформации, коэффициента Пуассона, модуля сдвига.

Данные характеристики являются одними из наиболее важных параметров горных пород для проведения численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива. Так, например, в материалах [21-24] по

использованию расчётных пакетов Plaxis, Midas, Fidesys и Ansys перечислены основные используемые модели грунтов (в терминологии авторов пособий Plaxis, как терминологии [25] – скальные горные породы – также являются «грунтами»).

В наиболее часто используемой модели расчёта НДС Мора-Кулона основными параметрами являются модуль Юнга, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения, сцепление (когезионная прочность), угол дилатансии. Вместо модуля Юнга иногда задают альтернативные параметры жесткости (упругости) – модуль сдвига или одометрический модуль (компрессионный модуль деформации, который однозначно связан с модулями Юнга или сдвига).

Аналогично в модели Хоека-Брауна основными параметрами являются: модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел прочности ненарушенной породы на одноосное сжатие, параметр ненарушенной породы, геологический индекс прочности, коэффициент нарушения, угол дилатансии, абсолютное значение всестороннего давления, а также некоторые параметры скального массива.

Отмечено, что модуль Юнга можно получить из испытаний образцов породы на осевое сжатие или на прямой сдвиг, используя образцы из ненарушенной скальной породы, а далее данное значение умножается на понижающий коэффициент с целью получения оценочного значения модуля образца горной породы при «естественном залегании».

Поэтому величина модуля может быть определена по одному из предлагаемых эмпирических корреляционных связей, приведенных ниже, для его использования в расчётной модели.

Так, например, в работе [25] показано, что, если нет прямых значений модуля неповрежденных образцов горных пород, можно оценить модуль неповрежденных горных пород из соотношения с пределом прочности образца (1.1):

$$E_i = MR\sigma_{ci}, \quad (1.1)$$

где  $MR$  - коэффициент модуля, впервые предложенный в [25], а  $\sigma_{ci}$  – предел прочности неповрежденного (структурно ненарушенного) образца горной породы.

Также модуль оценивают по геологическим индексам  $GSI$  и  $D$  [26]:

$$E_{rm} = 100000 \cdot \left( \frac{1-D/2}{1+e^{\left(\frac{75+25D-GSI}{11}\right)}} \right), \quad (1.2)$$

где  $GSI$  – это геологический индекс прочности, а  $D$  – коэффициент нарушения породы.

В модели трещиноватой скальной породы (модель JR), являющейся одной из наиболее сложных и представляющую собой анизотропную упругопластическую модель, специально предназначенную для моделирования поведения горной породы с учетом стратификации и направлений разломов, считается, что ненарушенная горная порода характеризуется полностью упругим поведением с постоянными параметрами жесткости (модулем упругости и коэффициентом Пуассона). При этом в направлении стратификации (напластования) могут быть заданы пониженные упругие свойства [27].

Выше были приведены одни из основных моделей, часто используемых при геомеханических расчётах горных выработок, месторождений. Также существуют другие модели – упрочняющего грунта (HS), «UBC3D-PLM», слабого грунта и другие. Во всех перечисленных моделях входными параметрами являются упругие характеристики. Даже если не было возможности определить модуль упругости на образцах в благоприятных лабораторных условиях, то его необходимо будет оценить.

При этом модули упругости могут быть определены принципиально различными физическими методами – разрушающими, полуразрушающими (редко выделяют в отдельную категорию) и неразрушающими способами.

Основными разрушающими исследованиями являются статические методы определения модуля упругости. К полуразрушающим способам следует отнести

методы, в которых при взаимодействии геоматериала с соответствующей аппаратурой на его поверхности остаются необратимые деформации.

Если используются неразрушающие способы, то при воздействии различными физическими полями образец возвращается в большинстве случаев в первоначальное состояние. Рассмотрим подробнее каждый из данных способов и методов.

## 1.2 Разрушающие статические методы определения модулей упругости образцов горных пород

При высоких значениях показателей TCR, RQD и SCR в соответствии с ведущими международными стандартами [28-29] применяют, так называемый, статический метод определения модуля упругости. В России действителен стандарт [30], который методически заключается в нагрузке образца горной породы до предела упругости (обычно это значение равно 50-60% от значения предела прочности образца при одноосном сжатии) с одновременной синхронизированной регистрацией продольных и поперечных деформаций образца. По построенным деформационным кривым зависимости «напряжение-деформация» определяют значение статического модуля упругости, модуля деформации и прочих деформационных характеристик (коэффициент поперечной деформации и коэффициент Пуассона).

Для определения продольных и поперечных деформаций используются тензорезисторы, которые приклеиваются на грани образца продольно и поперечно (взаимно ортогонально). Также могут использоваться тензометры любой конструкции (индикаторный, тензорезисторный, прижимной индуктивный, лазерный, оптический, емкостной и т.п.), обеспечивающие измерение продольных и поперечных деформаций образцов с погрешностью не более 2 %.

Общий алгоритм подготовки образцов для испытаний – типичный. Образцы изготавливаются в необходимой геометрической пропорции высоты к диаметру

(ширине), шлифуют их торцы и боковые поверхности без отклонения от перпендикулярности.

Важным требованием данной методики является обеспечение базы измерения деформации, которая должна быть не менее 15 мм, и превышать линейный размер зерен (неоднородностей), слагающих образец, не менее чем в 10 раз, также располагаться симметрично по отношению к середине образца. База измерения продольной деформации не должна превышать диаметр образца. Количество чувствительных элементов датчиков деформаций, закрепляемых на образце, должно быть не менее двух для каждого вида деформаций.

Европейский стандарт [28] и американский [29] не существенно отличаются методически от российского [30]. Но есть два важных отличия в предъявляемых требованиях к отбору образцов для испытаний, а именно – отбор образцов из керна для представления действительного среднего литологического типа породы (достигается это путем визуальной оценки минеральных составляющих горной породы, размеров, и формы зерен, расслоений, трещин и их типов или с помощью ультразвуковых измерений в них скоростей прохождения волн (п. 7.1 [31]) и отбор образцов для испытаний *структурно ненарушенного характера*.

По требованиям [28] при проведении испытания образец предварительно нагружают с целью «уплотнения» (смыкания трещин, пор и поровых каналов незначительных размеров) и только потом приступают к циклам нагружения и измерению деформаций. Предварительное «уплотнение» образца необходимо для получения деформационных характеристик материала, имеющий линейный характер. Кроме того, существующие стандарты предписывают иметь структурно ненарушенные и акустически «изотропные» образцы горных пород [31].

## 1.3 Полуразрушающие методы определения упругих свойств

### 1.3.1 Полевые полуразрушающие экспресс-методы

Модуль упругости можно также определить с помощью склерометров (молотков Шмидта, их производят многие компании – Proceq, RGK, «Новотест» и другие).

Одним из наиболее востребованных стал портативный прибор для полевого использования, разработанный швейцарской компанией Proceq ввиду большого количества справочной и научно-технической документации по его использованию, в том числе конкретно для горного направления. Его принцип работы заключается в регистрации ударного импульса в относительных единицах ( $R$  – значение отскока), возникающего при приложении к твердой поверхности тестируемого объекта механической нагрузки. Портативный прибор Rock Schmidt (называемый также молоток Шмидта) имеет две модификации, которые отличаются ударной энергией (в 2,207 Нм и 0,735 Нм). Первая подходит для работ на объектах контроля, например, при открытых горных работах, чтобы оценить модуль упругости кусков горных пород. А второй больше ориентирован для испытаний кернов [32].

Далее с помощью полученных при измерениях относительных единиц прочности рассчитываются значения модуля упругости для каждой исследуемой точки по методикам, предложенным Международным обществом горной механики и горной инженерии (International Society of Rock Mechanics, далее ISRM) [33, 34].

ISRM рекомендует следующее соотношение между модулем упругости и значением отскока:

$$E_t = c \cdot e^{dR}, \quad (1.3)$$

где  $E_t$  – модуль упругости, ГПа,  $c$  и  $d$  – константы, зависящие от типа породы,  $R$  – значение отскока.

Как показывает практика, данный метод является оценочным и в основном корректно позволяет оценить только твердость.

### 1.3.2 Определение упругих характеристик образцов малых размеров горных пород с помощью нано и микроиндентирования

Простейший прием измерения твердости как отношения силы вдавливания индентора в материал к площади его отпечатка превратился в новый метод изучения деформационных и прочностных характеристик микрообластей различных материалов [35].

Метод микро- и наноиндентирования характеризуется не только малыми усилиями нагрузок, в отличие от обычных испытаний, подразумевающих единичное определение твердости по величине отпечатка индентора, но и предполагает оценку возникающего усилия и глубины проникновения с нанометровым разрешением, как при внедрении индентора в поверхность материала, так и при его обратном движении, т.е. осуществляется непрерывный мониторинг в реальном времени кинетики погружения индентора известной геометрии в поверхность исследуемого материала под действием заданной по величине силы нагружения. Анализ получаемой в результате такого испытания диаграммы нагружения, аналогичной традиционной для одноосного сжатия диаграмме «напряжение-деформация» дает возможность оценки более десяти механических характеристик, в том числе оценить твердость, модуль Юнга (упругости) и вязкость разрушения в микро- и нанобъеме [36].

Так, например, в работе [36] оценивались структурные и механические свойства (твердость, модуль Юнга, коэффициент вязкости разрушения) и влияние масштабного фактора (размера зоны деформирования и приложенной нагрузки) для отдельных фаз (зерен) образцов железистого кварцита, гранита, песчаника и антрацита.

В основном, использование механических свойств, определенных с помощью методов индентирования отдельных зерен многофазных горных пород и железной руды, а также межфазных границ необходимо для прогнозирования

характера разрушения (межкристаллитное, интеркристаллитное) и извлекаемости полезных компонентов из руд. При этом исследуемый уровень – микро и нано [37-39].

Следует отметить, что в большом количестве научных работ, связанных с выяснением природы пластических свойств твердых тел в субмикро- и наномасштабе индентирование дополняется исследованиями на электронном микроскопе, рентгеновской микродифракции, оптической спектроскопии [40], термоактивационным анализом [41-42].

Как преимуществом, так и недостатком индентирования можно отметить возможность исследования многофазных материалов (например, композитов, горных пород), когда зачастую нужна информация о каждой фазе или структурной единице. Также важно отметить, что в большинстве случаев исследования с помощью нано-микроиндентирования проводят на образцах малого размера, объем которых не превосходит  $2,0 \text{ см}^3$  и проводятся в комплексе с оптической микроскопией или электронной спектроскопией [43-52].

#### 1.4 Неразрушающие динамические методы определения модулей упругости образцов горных пород

Ввиду того, что не всегда является возможным определение статических модулей упругости по ряду причин (малое количество геологического материала, пробы низкого качества с низкими показателями TCR, SCR, RQD и др.), а полуразрушающие методы дают лишь оценочный характер значений модулей упругости, переходят к динамическим неразрушающим методам определения упругих свойств геоматериала.

В таких случаях возможно применение таких методов, как рентгеновская компьютерная томография и ультразвуковая диагностика с целью определения модулей упругости на образцах меньших размеров по сравнению с требованиями стандартов, разработанных для статических методов.

#### 1.4.1 Определение упругих свойств с помощью рентгеновской компьютерной томографии

Метод оценки упругих свойств случайных структур на основе цифровых изображений при применении рентгеновской томографии с использованием метода конечных элементов подробно описан в работах [53-56].

Впоследствии в работах [57-60] было показано, что на основе данных рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) и численного моделирования могут быть спрогнозированы и упругие свойства горных пород различного генотипа.

Основными данными для таких оценок являются микрогеометрия, состав минеральной фазы и микромеханика контактных зон. Микрогеометрия несет, в основном, морфометрические сведения об элементах горных пород (зернах, отдельных агрегатах), а также об их взаимном расположении. Последние достижения в получении микротомографических изображений в комплексе с классическими петрофизическими методами дают возможность прямого определения трехмерной структуры и текстуры поровой системы и вида контактов между зернами. Это позволяет оценивать упругие свойства породы непосредственно из трехмерных изображений.

В [58, 59] в качестве исходных данных использованы результаты микро РКТ с разрешающей способностью 2–10 мкм. Для расчета упругих свойств модельных образцов из спекшихся стеклянных шариков и карбонатных пород применен статический метод, при котором в качестве граничных условий задаются постоянное давление или постоянное смещение и рассматриваются только линейные упругие свойства. Каждый воксел в 3D изображении размером примерно  $2 \text{ мкм}^3$  рассматривается как однородный элемент.

Для данных образцов получены зависимости модуля Юнга и модуля всестороннего сжатия от пористости, с использованием которых найдены скорости упругих волн. Предсказанные на основе численного моделирования значения скоростей отличались от экспериментально измеренных на 8-12 %.

В работах [58, 59] отмечалось также, что поскольку структура порового пространства карбонатных пород достаточно сложная, часто бывает необходимо при определении упругих свойств трудоемкий процесс РКТ комплексировать с электронной микроскопией, обладающей также высокой разрешающей способностью, как и РКТ.

Так, например, авторами [60] исследовались песчаники Береа, находящегося в штатах Мичиган, Огайо, Пенсильвании, являющиеся породами-коллекторами.

Эти же породы рассматривались в [61], где с помощью алгоритма Монте-Карло представлена схема инверсии для оценки трещин в процессе визуализации внутренней структуры образца. Данный алгоритм дополнялся численными расчётами с использованием дифференциальной эффективной модели среды и модели Кустера-Токсеца. В результате, учитывая структурные особенности образцов, были оценены упругие свойства песчаников Береа.

#### 1.4.2 Ультразвуковые исследования, стандартные методики ГОСТ, ASTM

Российский стандарт ГОСТ 21153.7-75 [62] 1975 года (последняя редакция от 1981 года), который актуален в настоящее время, регламентирует измерение скоростей распространения упругих волн в образцах горных породах по измеренным задержкам их импульсов. Значения скоростей волн вычисляют по формулам:

$$c_l = \frac{l}{t_l - t_d}, \quad (1.4)$$

$$c_t = \frac{l}{t_s - t_d}, \quad (1.5)$$

где  $l$  – расстояние между преобразователями по оси прозвучивания;  $t_l$  – время пробега упругого импульса продольной волны от излучателя до приемника;  $t_t$  – время пробега импульса сдвиговой волны от излучателя до приемника;  $t_d$  – время задержки импульса в аппаратуре и преобразователях.

Также важно отметить, что в соответствии с [62] образцы подготавливаются с размерами, соответствующим двум неравенствам, косвенно зависящим от значения продольной и сдвиговой волн:

$$l \geq c_l \cdot \frac{dt}{\delta_c}, \quad l \geq c_t \cdot \frac{dt}{\delta_c} \quad (1.6)$$

где  $c_l$  и  $c_t$  – скорости распространения продольной и сдвиговой волн, м/с,  $dt$  – абсолютная погрешность отсчитывания времени, равная половине цены деления шкалы времени и  $\delta_c$  – заданная относительная погрешность измерения скорости.

В американском стандарте [122], в отличие от российского, описываются требования к оборудованию и процедурам измерения скоростей импульсов продольных и сдвиговых волн в образцах горных пород изотропной природы или образцов, которые проявляют небольшую анизотропию. В данной методике есть существенные требования к анизотропии, определению характерного размера зерна испытываемой горной породы и геометрическим параметрам образца.

Анизотропия определяется по изменению скорости продольной волны в зависимости от направления ее прохождения в горной породе. Значения скоростей, измеренных в трех взаимно перпендикулярных направлениях, не должны отклоняться более чем на 2% от их среднего значения, ввиду того, что эти различия могут привести к большим ошибкам при расчете модулей упругости и сдвига.

Расчёт упругих характеристик отобранных образцов описанном выше способе производится следующим образом:

$$E = [\rho \cdot c_t^2 \cdot (3 \cdot c_l^2 - 4 \cdot c_t^2)] / (c_l^2 - c_t^2), \quad (1.7)$$

$$G = \rho \cdot c_t^2, \quad (1.8)$$

$$\mu = (c_l^2 - 2 \cdot c_t^2) / [2 \cdot (c_l^2 - c_t^2)], \quad (1.9)$$

$$\Lambda = \rho \cdot (c_l^2 - 2 \cdot c_t^2), \quad (1.10)$$

$$K = \rho \cdot (3 \cdot c_l^2 - 4 \cdot c_t^2) / 3, \quad (1.11)$$

где  $E$  – модуль упругости Юнга, Па;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $G$  – модуль сдвига, Па;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\Lambda$  – константа Ламе, Па;  $K$  – объемный модуль, Па.

Важно отметить, что необходимо при измерениях учитывать такие параметры, как средний размер зерна породы  $d$  (м), минимальный поперечный размер образца  $D$  (м), подготовленный для испытания, доминирующая длина волны  $\lambda$  последовательности импульсов (м),  $V$  скорость распространения импульсов, собственная резонансная частота преобразователей  $f$  (Гц). Для корректного определения значений скоростей, должно выполняться следующее неравенство:

$$D \geq 5 \cdot \left(\frac{c}{f}\right) \geq 15 \cdot d \quad (1.12)$$

Поскольку скорость волны  $c$  и размер зерна  $d$  являются неотъемлемыми свойствами геоматериала, то  $f$  и  $D$  должны быть подобраны так, чтобы они удовлетворяли неравенству (1.12), указанному на рисунке 1. Для любого конкретного значения  $\left(\frac{c}{f}\right)$  допустимые значения диаметра образца  $D$  лежат выше диагональной линии на рисунке 1.1, в то время как допустимые значения размера зерна  $d$  лежат ниже диагональной линии. Для конкретного диаметра допустимые значения для длины образца  $L$  лежат слева от диагональной линии.

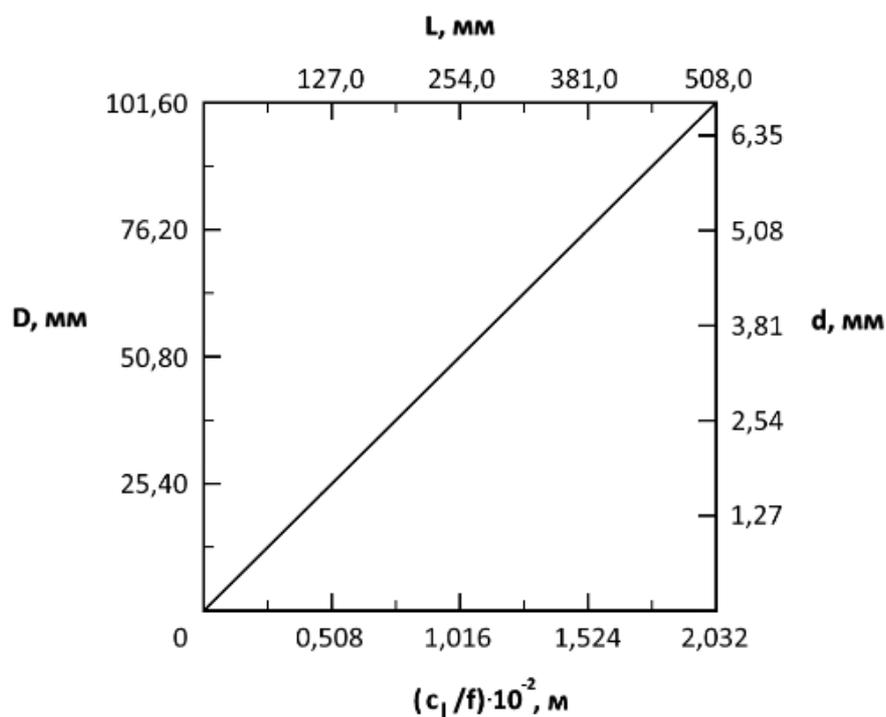


Рисунок 1.1 – График, показывающий допустимые значения диаметра образца, длины образца и среднего размера зерна в зависимости от отношения скорости распространения волны сжатия к частоте резонанса

Можно сделать вывод, что с точки зрения физического эксперимента, данный алгоритм более корректный, чем изложенный в [62], ввиду того, что образцы подбираются для испытаний по множеству косвенных параметров, которые непосредственно влияют на значения скоростей распространения волн в изотропной или слабо анизотропной среде.

#### 1.4.3 Методы определения скоростей волн в образцах горных пород и расчёт на их основе динамических модулей упругости

Динамические модули упругости (далее ДМУ) в большинстве случаев рассчитывают по скоростям продольных и сдвиговых волн в образцах горных пород, измеренным в лабораторных условиях [63, 64].

Существует достаточно много ультразвуковых методов определения скоростей упругих волн на образцах, к которым в первую очередь относятся

следующие: резонансный [65], критических углов [66], теневой [67, 68] и отраженных волн или эхо-режим [69].

В большинстве из перечисленных методов используются пьезопреобразователи в качестве излучателей и приемников.

Частотный диапазон преобразователей варьируется от 50 кГц до 1 МГц [70, 71]. Более низкие частоты (менее 50 кГц) не используются ввиду их сильной дифракции, а более высокие (выше 1 МГц) в связи с сильным затуханием ультразвука в геоматериалах. Следует отметить, что эффективное излучение и прием акустических волн для пьезопреобразователей возможен лишь на резонансных частотах.

Точное измерение скоростей и затухания упругих волн затруднено, потому что на их параметры влияют дифракция и рассеяние на неоднородностях и др [72, 73]. Следовательно, необходимы поправки на эти эффекты и разработка новых аналитических моделей определения данных характеристик.

При исследовании упругих свойств необходимо также учитывать дисперсию скорости звука, то есть ее зависимость от частоты. Дисперсия волн всех типов может быть обусловлена частотной зависимостью коэффициента затухания и насыщением флюидами геоматериала, дифракцией и др [74-75]. Для некоторых горных пород, например, сланцев, дисперсия скоростей довольно сильна, и ее необходимо принимать во внимание при интерпретации и сравнении данных сейсмических исследований, акустического каротажа и лабораторных ультразвуковых измерений на кернах (частей керна) [76].

Часто возникает задача установления взаимосвязей механических свойств с измеренными динамическими характеристиками [77-84]. В данных работах приведены уравнения, связывающие динамические и статические модули упругости. Однако полученные аналитические выражения привели к большим относительным ошибкам, достигающим 46%. Поэтому предлагалось исследовать эмпирические корреляции отдельно для разных типов горных пород. Подобные исследования проводились в [85-87].

В статьях [83, 88] авторы определяли значения скоростей с помощью иммерсионной теневой установки, в которой в результате поворота образца на его границе раздела за счёт конверсии мод генерируется и сдвиговая волна. Преимуществом данного рода установки является то, что при одном излучателе и приемнике возможно регистрировать два типа волн в отличии от «прямого» теневого режима работы ультразвуковых установок [89]. Однако исследования усложняются отсутствием четкой фиксации при измерении скоростей волн, особенно сдвиговой, которая генерируется при определенных углах поворот образца.

Установки, реализующие контактный эхо-режим являются наиболее простыми и чувствительными, однако они требуют тщательной подготовки поверхности. Кроме того, в большинстве случаев пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) предназначены в большинстве случаев для генерации узкополосных акустических волн (продольных или сдвиговых), поэтому для определения модулей упругости требуется, снова же, два преобразователя, которые в основном узкополосные. И, в основном, данный метод эффективен для исследования однородных и изотропных материалов в дефектоскопии [90-92].

Часто эхо режим используют в геоакустике. В [93-95] для обнаружения границы раздела уголь-порода использовали обработку эффективных ультразвуковых эхо-сигналов в многослойных средах. Было отмечено, что сложно эффективно и точно распознать эхо-сигналы от границы раздела уголь-порода с помощью обычных методов обработки сигналов, таких как преобразование Фурье (FT), вейвлет-преобразование (WT) и разложение по эмпирическим модам (EMD). Для устранения данных проблем разрабатываются новые алгоритмы и методы обработки сигналов. Разработка новых алгоритмов и методов обработки эхо-сигналов (неважно от какого типа генерации ультразвуковых волн) является актуальной задачей и для лабораторных задач исследования образцов.

#### 1.4.4 Сканирующая акустическая микроскопия

Сканирующая акустическая микроскопия как один из интроскопических методов в последние годы интенсивно развивался с 1991 по 1996 год (по результатам анализа публикационной активности). Данный метод позволяет не только получать акустические изображения, но и измерять такие физико-механические параметры различных сред, как локальные модули упругости, коэффициенты вязкости, изучать динамику физико-химических процессов, происходящих в них. Зондирование объекта в этом методе проводится с помощью акустических волн ультразвукового и гиперзвукового диапазонов с частотами от 10 МГц до 3 ГГц.

В основе метода лежит возможность регистрации отраженных от поверхности образца сфокусированных высокочастотных сигналов упругих волн, амплитуда которых однозначно определяет акустический импеданс окрестности некоторой точки образца. Таким образом идентифицируются зерна, их размеры, цементация, определяются геометрия пор, строится изображение микроструктуры поверхности по аналогии со сканирующей электронной микроскопией.

Были определены микротрещины в зернах кварца [96], исследованы различные минеральные фазы [97], изучена анизотропия импеданса образцов горных пород [98], оценены межфазные связи и микроструктура в образцах бетона [99].

Разрешение акустических микроскопов практически сравнимо с разрешением оптических, но в отличие от последних используется для непрозрачных сред. При повышении при низких температурах рабочей частоты ультразвука до десятков гигагерц разрешающая способность акустических микроскопов приближается к разрешению электронных микроскопов [100-106]. Метод использовался для изучения локальных свойств геоматериалов. Основными недостатками использования акустических микроскопов являются высокая стоимость и малая глубина проникновения упругих волн из-за сильного затухания высоких частот в гетерогенных средах.

#### 1.4.5 Лазерная ультразвуковая диагностика гетерогенных сред

Существует два метода диагностики гетерогенных сред с использованием лазерных источников ультразвука: контактный и бесконтактный.

При контактном способе генерация упругих волн с помощью лазерного излучения осуществляется следующим образом. Короткий лазерный импульс поглощается в генераторе, а за счет термоупругого расширения нагретой области формируется широкополосный акустический импульс продольных волн. Полоса частот данного импульса зависит от выбора среды генератора и длительности лазерного импульса может простирается от десятков кГц до десятков МГц [107].

Использование столь широкой полосы частот позволяет решать ряд задач. Например, выделяя три частотных диапазона в зависимости коэффициента затухания, можно определить характерные размеры зерна (минимальный, средний и максимальный) в поликристаллических структурах (металлах и сплавах) и геоматериалах [108].

Более того, приведенному выше частотному диапазону 50 кГц-30 МГц соответствует длительность импульсов порядка 70 нс, что дает возможность исследовать неоднородности гетерогенных структур с характерными масштабами от 100 мкм и менее.

Например, применение пикосекундных лазеров позволяет возбуждать сверхкороткие импульсы продольных акустических волн, которые могут быть использованы для неразрушающего контроля тонких пленок или покрытий [109] и картирования упругих постоянных тонких пленок [110].

При бесконтактном способе возбуждения лазерное излучение поглощается непосредственно в приповерхностном слое объекта исследования. Ограниченность оптического пучка в пространстве приводит к генерации всех трех типов упругих волн.

Регистрация рассеянных от неоднородностей и отраженных от границ раздела акустических сигналов базируется также на бесконтактных интерферометрических схемах [111].

Однако данный метод обладает двумя существенными недостатками. При поглощении лазерного излучения непосредственно в гетерогенной среде от точки к точке меняется коэффициент поглощения, что приводит к изменению амплитуды и формы возбуждаемых импульсов упругих волн и затрудняет тем самым процесс диагностики.

Во-вторых, при бесконтактных интерферометрических схемах регистрации динамический диапазон приемной аппаратуры существенно меньше, чем у контактного метода.

При термоупругом расширении в твердом теле возбуждаются продольные волны, а сдвиговые возникают только за счёт граничных условий и их амплитуды малы [112]. В бесконтактных лазерных ультразвуковых установках сдвиговые и поверхностные волны генерируются за счёт ограниченности оптического пучка в пространстве. В работе [113] для определения модулей упругости использовалась контактная установка, работающая в эхо-режиме, однако механизм генерации и регистрации поперечных волн не был обоснован.

В работе [114] разработаны теоретические модели и установлены закономерности процесса лазерного возбуждения в геосреде мощных коротких импульсов продольных, сдвиговых и поверхностных волн. Однако в [114-116] не исследованы процессы трансформации данных импульсов на границе раздела двух сред. В [117-118] разработан метод оценки обусловленной выветриванием нарушенности горных пород на основе лазерной ультразвуковой спектроскопии и метод диагностики горных пород, обеспечивающий повышение информативности и надежности контроля параметров их зернистой структуры [119] и пористости.

Данные исследования являются хорошими предпосылками для дальнейшего развития данного метода для исследования гетерогенных сред и их параметров.

## 1.5 Выводы, постановка цели и задач исследования

Проведенный выше анализ методов определения динамических модулей упругости образцов горных пород неразрушающими методами в условиях малого

количества исходного геологического материала показал, что данные методы являются востребованными. Однако у таких методов, как нано и микроиндентирование и рентгеновская томография, есть существенные недостатки – высокая стоимость, работа только с образцами малого размера и длительное время исследования для получения необходимого разрешения. У акустической микроскопии основными недостатками использования акустических микроскопов являются высокая стоимость и малая глубина проникновения упругих волн из-за сильного затухания высоких частот в гетерогенных средах. А основным недостатком ультразвуковых исследований являются пьезоэлектрические ультразвуковые узкополосные преобразователи, которые в основном предназначены для генерации одной моды акустических волн (продольных или сдвиговых), поэтому для определения модулей упругости требуется два преобразователя, также они не дают необходимой точности при измерении скоростей волн, что приводит к большой погрешности в расчёте динамических модулей упругости. Некоторые сравнительные характеристики различных методов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Сравнение методов определения модулей упругости

№	Метод	Размерность исследуемых образцов	Методика, стандарт	Примечание, краткое описание
1	Разрушающий, статический	От 30 мм до 90 мм (диаметр ( $d$ ) или сторона квадрата), высота ( $h = 2d$ )	ГОСТ 28985-91, ASTM D 3148 – 02, DIN EN 14580-2005	Данный метод разрушающий, необходима большая выборка образцов
2	Полуразрушающий, упругий отскок	Любой, но UCS (предел прочности) должен быть от 1 МПа до 100 МПа	Рекомендации ISRM, Aydin A	Метод предназначен для определения прочности ударным импульсом
3	Неразрушающий, динамический, РКТ	В основном используются микротомографию, размеры – до 10-30 мм	Не стандартизированы	Томографы делятся на разные типы, в зависимости от разрешающей способности
4	Неразрушающий, динамический, ультразвуковой	Минимальный линейный размер 110 мм при 140 кГц или требования ASTM	ГОСТ 21153.7-75, ASTM DIN 2845-08	Размеры исследуемых образцов зависят от центральной частоты преобразователей

		$(D \geq 5 \cdot (\frac{c}{f}) \geq 15 \cdot d)$		
5	Неразрушающий, динамический, лазерно-ультразвуковой	От 1 мм до 50 мм С учетом выбранного режима	Локальные методики	Широкополосный сигнал позволяет исследовать в эхо-режиме различные по толщине образцы

Одним из малоизученных вопросов является влияние дисперсии (частотная зависимость) скорости распространения упругих волн и определение по ним динамических модулей упругости.

Следовательно, разработка и использование аналитических методов описания процессов генерации и распространения коротких импульсов продольных и сдвиговых акустических волн с гауссовым поперечным профилем, распространяющихся в образцах горных пород с целью прецизионного измерения скоростей упругих волн и восстановлению по ним упругих характеристик представляется перспективным направлением исследований.

Целью работы является разработка и обоснование комплексного методов определения динамических модулей упругости разномасштабных образцов горных пород на основе прецизионного измерения в них скоростей продольных и сдвиговых акустических волн, в том числе возникающих при нормальном падении широкополосных ультразвуковых пучков с гауссовым распределением амплитуды давления по поперечному сечению.

Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести анализ методов определения модулей упругости образцов горных пород;
2. Обосновать генерацию упругой сдвиговой акустической волны при нормальном падении ультразвуковых пучков с гауссовым распределением амплитуды по поперечному сечению на границы раздела «изотропное твердое тело-образец» и «образец-воздух» в эхо-режиме лазерной ультразвуковой диагностики;
3. Разработать аналитическую модель для расчёта временных форм акустических сигналов, учитывающую возникновение сдвиговых волн на

границах раздела «изотропное твердое тело-образец» и «образец-воздух» и верифицировать ее;

4. Разработать оптимизационный алгоритм расчёта значений скоростей упругих волн на основе модельной временной формы сигнала, провести его верификацию и апробацию на модельных образцах;
5. Провести испытания разномасштабных образцов горных пород различного генотипа для определения динамических модулей упругости с помощью оптимизационного алгоритма и использованием комплексного метода лазерной ультразвуковой диагностики;
6. Разработать методику определения динамических модулей упругости на основе прецизионного измерения скоростей упругих волн комплексным методом лазерной ультразвуковой диагностики.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ УПРУГОЙ СДВИГОВОЙ ВОЛНЫ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ НА ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА «ИЗОТРОПНОЕ ТВЕРДОЕ ТЕЛО-ОБРАЗЕЦ» И «ОБРАЗЕЦ-ВОЗДУХ». ЭХО-РЕЖИМ ЛАЗЕРНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ.

2.1 Теоретические оценки параметров продольных и сдвиговых волн, возникающих на границе раздела двух изотропных сред и границе раздела «геоматериал-воздух»

Принцип работы существующей контактной лазерно-ультразвуковой аппаратуры для диагностики структуры и свойств гетерогенных сред основан на термооптическом эффекте [120]. При поглощении лазерного излучения в специальном оптико-акустическом генераторе (ОА генератор) и последующем расширении приповерхностной нагретой области происходит генерация мощных наносекундных ультразвуковых импульсов продольных упругих волн. Выбор среды генератора и параметров лазерного излучения позволяет задавать необходимые параметры возбуждаемых сигналов: строго контролируемый временной профиль, амплитуду давления до 1 МПа, частотный диапазон от 50 кГц до 30 МГц. Особенностью данных импульсов является то, что распределение давления в поперечном сечении акустического пучка является также гауссовым как и пространственное распределение интенсивности лазерного излучения. При дальнейших расчетах будем считать, что возбуждение ультразвука реализуется гауссовым пучком  $H(\mathbf{r}_\perp) = \exp[-r_\perp^2/a^2]$  (здесь  $\mathbf{r}_\perp = \{x, y\}$ ,  $a$  – радиус пучка). Такое распределение давления в поперечном сечении приводит к тому, что в падающей на границу раздела «генератор – образец» упругой продольной волне присутствуют лучи, отклоняющиеся от нормали на некоторый малый угол. В этом случае на границе раздела возникают две отраженные волны (продольная и вертикально поляризованная сдвиговая) и две прошедшие (также продольная и вертикально поляризованная сдвиговая).

Основная задача данного раздела заключается в обосновании генерации сдвиговой волны гауссовым акустическим пучком при наличии границ раздела сред, возможности регистрации данной волны широкополосным пьезоприемником, совмещенным с оптико-акустическим генератором, а также в расчете суммарного амплитудного коэффициента преобразования данной волны.

Рассмотрим подробнее процесс генерации на границах раздела двух типов волн. Известно, что волна сложной формы может быть разложена по плоским волнам с использованием пространственного и временного Фурье-преобразования. Известно, что пучок с произвольным поперечным профилем может быть разложен на плоские волны с помощью пространственного преобразования Фурье по пространству, а импульс с произвольной временной формой может быть разложен на монохроматические волны с помощью преобразования Фурье по времени. Поскольку процессы генерации и распространения упругих волн описываются системой линейных уравнений, то для получения сложной формы продольной и сдвиговых волн, прошедших через различные границы раздела сред, достаточно исследовать поведение одной гармоники с определенным значением лучевого параметра и использовать обратное Фурье-преобразование.

Схема эксперимента в эхо-режиме изображена на рисунке 2.1 (на примере лазерного ультразвукового дефектоскопа «УДЛ-2М» с оптико-акустическим преобразователем «ПЛУ-6П-02»).

Лазерный импульс подводится к оптико-акустическому генератору, приклеенному к прозрачной призме из плексигласа. Пьезоэлектрический широкополосный приёмник продольных волн, выполненный из поливинилиденфторида, приклеен к противоположной стороне призмы.

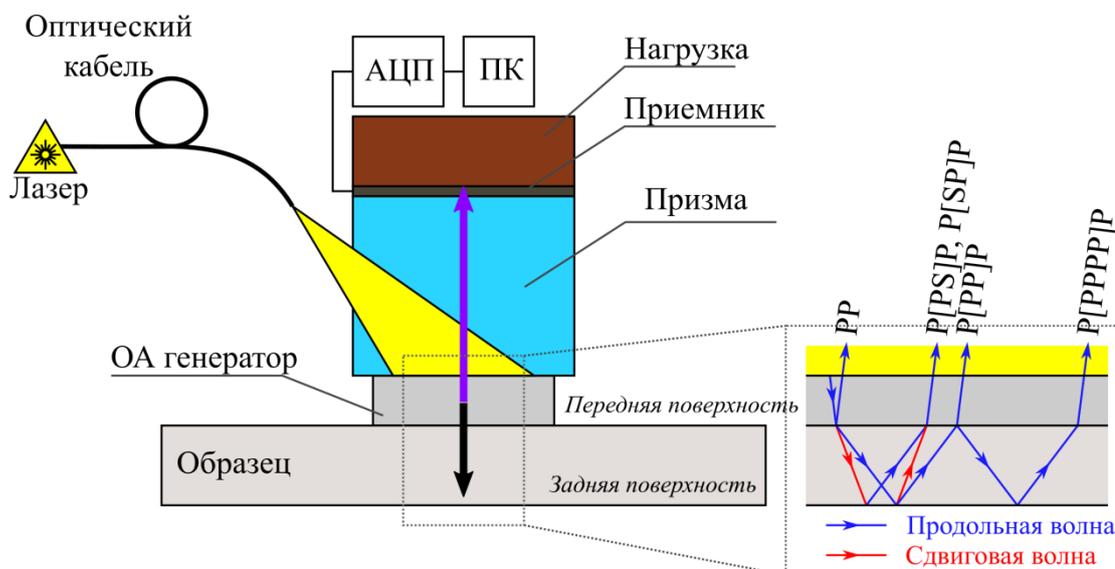


Рисунок 2.1 – Схема эксперимента в режиме эхо-импульсов и хода акустических волн в нём (а – схема пьезоэлектрического преобразователя в процессе эксперимента, б – схема распространения и типов отражённых волн)

Лазерное излучение поглощается в поверхностном слое оптико-акустического генератора. В результате термоупругого эффекта формируются начальные распределения механических напряжений в генераторе и в противоположных направлениях начинают распространяться две продольные волны с гауссовым распределением давления по поперечному сечению: первая распространяется в сторону приёмника (фиолетовая стрелка на рисунке 2.1, а), вторая – в сторону образца (черная стрелка на рисунке 2.1, а).

Обозначим первую волну как «Р»-волна, поскольку она чисто продольная. Вторая волна распространяется через оптико-акустический генератор к границе раздела среды генератора и среды образца. Как отмечалось выше, в акустическом пучке на границе раздела присутствуют пространственные гармоники, угол падения которых отличен от нуля. Поэтому на границе раздела возникает две отраженные и две преломленные волны. Будем называть продольную волну, отражённую от этой границы волны «РР»-волной (рисунок 2.1,б; на рисунке все углы изображены в увеличенном масштабе). Отраженная сдвиговая волна широкополосным пьезоприемником не регистрируется, поэтому в дальнейшем мы ее не рассматриваем. Прошедшая часть волны состоит из продольной и сдвиговой

волн. Две волны, преломлённые на границе раздела «преобразователь-образец», достигают свободной поверхности образца, где происходит их отражение и конверсия мод.

Отражённые волны распространяются в сторону границы «образец-преобразователь», после преломления на которой поступают в преобразователь. Для прецизионного определения скоростей продольных и сдвиговых волн нам нужны будут только три волны, для которых введём следующую систему обозначений волн: «P[PP]P», «P[PS]P» и «P[SP]P» (рисунок 2.1, б). В квадратных скобках перечислены типы волн, распространяющихся внутри образца в хронологическом порядке. Рассмотрим только те волны, пришедшие на пьезопреобразователь, по которым можно определить их скорости.

Выше введены следующие обозначения: P – продольная волна, S – сдвиговая. Система обозначения волн принята в соответствии с [121]. В дальнейшем будем использовать нижние индексы «1» и «2», отнесенные к первой среде (генератора) и второй среде (образца) соответственно. Дополнительным нижним индексом «0» обозначаем волны, отраженные от нижней границы образца (рис.2.2). Скорость продольной волны можно определить с помощью «P[PP]P» волны, которая образовалась следующим образом:

- 1) при падении  $P_1$  в исследуемый объект от границы раздела «генератор-образец» распространяется продольная волна  $P_2$  (сдвиговую  $S_2$  пока не рассматриваем);
- 2)  $P_2$  отражается от границы образца; при отражении возникают сдвиговая  $S_{02}$  и продольная  $P_{02}$ ;
- 3) продольная волна  $P_{02}$  при достижении границы раздела «генератор-образец» преломляется, образуя волну  $P_p$ , которая регистрируется широкополосным пьезоприемником (преобразователем).

Пункты 1)-3) справедливы для всех значений лучевого параметра, включая нормальное падение продольной волны.

Сформировавшая таким образом волна обозначается как «P[PP]P» и по ее временной задержке относительно опорной волны рассчитывается скорость продольной волны.

Рассмотрим подробнее процесс генерации сдвиговой волны и возможность расчета ее скорости, если на границу раздела «генератор-образец» падает продольная волна с гауссовым распределением давления по поперечному сечению. В этом случае для гармоник, угловой коэффициент которых отличен от нуля, возникает следующая ситуация:

- 1) при падении  $P_1$  (рис.2.2) на границу раздела «1-2» в результате преломления возникает в среде 2 также сдвиговая волна  $S_2$ ;
- 2) при отражении от нижней границы образца часть энергии  $S_2$  трансформируется в продольную волну  $P_{20}$  на свободной нижней поверхности образца;
- 3) при преломлении на верхней границе «2-1» большая часть энергии  $P_{20}$  переходит в продольную волну  $P_s$ , которая распространяется к широкополосному пьезоприемнику. Данная волна обозначается как P[SP]P.

Аналогичная ситуация наблюдается при формировании волны P[PS]P.

- 1) при падении  $P_1$  (рис.2.2) на границу раздела «1-2» в результате преломления возникает в среде 2 продольная волна  $P_2$ ;
- 2) но при отражении от нижней границы образца возникает сдвиговая волна  $S_{02}$  (помимо описанной выше  $P_{02}$ );
- 3) при достижении границы раздела «образец-генератор» преломляется, образуя волну  $P_s$ ;
- 4) и распространяется к датчику, снова будучи продольной волной  $P_s$ .

Следует подчеркнуть, что волна «P[SP]P» имеет то же время распространения, что и волна «P[PS]P», поэтому приёмником регистрируется объединённая волна «P[PS]P + P[SP]P».



В нашем рассмотрении  $i_1$  и  $i_2$  – углы, под которыми распространяются продольные волны,  $j_1$  и  $j_2$  – углы, под которыми распространяются поперечные волны (нижние индексы относятся к соответствующей среде, в которой распространяется волна P или S), также  $\rho_1, c_{l1}, c_{t1}$  и  $\rho_2, c_{l2}, c_{t2}$  – обозначения плотностей и скоростей продольных и поперечных волн соответственно в средах 1 и 2.

Рассмотрим одну из гармоник колебательной скорости  $V(t, \mathbf{r}_\perp, z)$  частиц среды, записанную в пространстве временных частот:

$$\tilde{V}(\omega, \mathbf{k}_\perp, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} dt \iint_{-\infty}^{+\infty} d^2 \mathbf{r}_\perp V(t, \mathbf{r}_\perp, z) e^{i\omega t - i\mathbf{k}_\perp \cdot \mathbf{r}_\perp} \quad (2.1)$$

Здесь координата  $z$  определяет направление распространения волн,  $\mathbf{r}_\perp = \{x, y\}$ ,  $\omega$  – циклическая частота,  $\mathbf{k}_\perp$  – поперечный волновой вектор.

По закону Снелла:

$$\sin i_1/c_{l1} = \sin i_2/c_{l2} = \sin j_1/c_{t1} = \sin j_2/c_{t2} = p, \quad (2.2)$$

где  $p$  назовем лучевым параметром, равным отношению синуса соответствующего угла к скорости распространения данного типа волн ( $p = k_\perp/\omega = \sin i/c_l = \sin j/c_t$ ).

Лучевой параметр  $p$  однозначно определяет угол распространения волны заданного типа в среде. Схема образующихся волн ранее была показана на рисунке 2.2.

На каждой границе раздела сред происходит конверсия (трансформация) мод. Коэффициенты прохождения, отражения и трансформации  $W$  для плоских волн даны в [121]. В таблице 2.1 приведены значения коэффициентов прохождения, отражения и трансформации в соответствии с [121], необходимые для расчёта волн «PP», «P[PS]P», «P[SP]P», «P[PP]P» и «P[PPPP]P».

Скорости данных типов волн в дальнейшем будут использованы для определения динамических модулей упругости. Следует подчеркнуть, что данные коэффициенты зависят только от лучевого параметра  $p$  и свойств сред 1 и 2.

Таблица 2.1 – Коэффициенты прохождения, отражения и трансформации мод

№	Коэффициент преобразования волны	Формула коэффициента
1	Коэффициент прохождения продольной волны в преобразователе в продольную в образце	$W_{P_1P_2} = 2\rho_1 \frac{\cos i_1}{c_{l1}} F \frac{c_{l1}}{c_{l2}} / D$
2	Коэффициент отражения продольной волны в сдвиговую на свободной поверхности образца	$W_{P_2S_{02}} = 4 \frac{c_{t2}}{c_{l2}} p \frac{\cos i_2}{c_{l2}} \left( \frac{1}{c_{t2}^2} - 2p^2 \right) / D_2^F$
3	Коэффициент трансформации сдвиговой волны в образце в продольную в преобразователе	$W_{S_{02}P_S} = -2\rho_2 \frac{\cos j_2}{c_{t2}} G p \frac{c_{t2}}{c_{l1}} / D$
4	Коэффициент трансформации продольной волны в преобразователе в сдвиговую в образце	$W_{P_1S_2} = -2\rho_1 \frac{\cos i_1}{c_{l1}} G p \frac{c_{l1}}{c_{t2}} / D$
5	Коэффициент отражения сдвиговой волны в продольную на свободной поверхности образца	$W_{S_2P_{20}} = 4 \frac{c_{t2}}{c_{l2}} p \frac{\cos j_2}{c_{t2}} \left( \frac{1}{c_{t2}^2} - 2p^2 \right) / D_2^F$
6	Коэффициент прохождения продольной волны в образце в продольную в преобразователе	$W_{P_{20}P_S} = 2\rho_2 \frac{\cos i_2}{c_{l2}} F \frac{c_{l2}}{c_{l1}} / D$

В таблице 2.1 введены обозначения, значения которых рассчитываются по формулам, приведенным в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Основные рассчитываемые параметры для коэффициентов

$a = \rho_2(1 - 2c_{t2}^2p^2) - \rho_1(1 - 2c_{t1}^2p^2)$	$E = b \frac{\cos i_1}{c_{l1}} + c \frac{\cos i_2}{c_{l2}}$
$b = \rho_2(1 - 2c_{t2}^2p^2) + 2\rho_1c_{t1}^2p^2$	$F = b \frac{\cos j_1}{c_{t1}} + c \frac{\cos j_2}{c_{t2}}$

$c = \rho_1(1 - 2c_{t1}^2 p^2) + 2\rho_2 c_{t2}^2 p^2$	$G = a - d \frac{\cos i_1}{c_{l1}} \frac{\cos j_2}{c_{t2}}$
$d = 2(\rho_2 c_{t2}^2 - \rho_1 c_{t1}^2)$	$H = a - d \frac{\cos i_2}{c_{l2}} \frac{\cos j_1}{c_{t1}}$
$D_1^F = \left( \frac{1}{c_{t1}^2} - 2p^2 \right)^2 + 4p^2 \frac{\cos i_1}{c_{l1}} \frac{\cos j_1}{c_{t1}}$	$D = EF + GHp^2$

При описании распространения каждой гармоники с определенным лучевым параметром, являющейся плоской монохроматической акустической волной, её амплитуда умножается на коэффициенты прохождения, отражения или трансформации, а фаза приобретает дополнительный сдвиг, пропорциональный длине пробега и обратно пропорциональный скорости звука. Прямой подстановкой выражений из таблицы 2.2 можно убедиться, что произведение коэффициентов прохождения, отражения и трансформации ( $W_{P[PS]P}$  и  $W_{P[SP]P}$ ) для волн «P[SP]P» и «P[PS]P» одинаково:

$$W_{P[PS]P} = W_{P_1 P_2} \cdot W_{P_2 S_0 2} \cdot W_{S_0 2 P_S} = W_{P_1 S_2} \cdot W_{S_2 P_{20}} \cdot W_{P_{20} P_S} = W_{P[SP]P}, \quad (2.3)$$

$$W_{P[PS]P} = W_{P[SP]P} = -16\rho_1\rho_2 \frac{\cos i_1}{c_{l1}} \frac{\cos i_2}{c_{l2}} \frac{\cos j_1}{c_{t1}} \left( \frac{1}{c_{t1}^2} - 2p^2 \right) \frac{FGp^2}{D^2 D_1^F}, \quad (2.4)$$

Таким образом, приходящие на пьезоприемник волны «P[SP]P» и «P[PS]P», несущие информацию о сдвиговой волне в образце, имеют одну и ту же амплитуду и приходят в одну точку.

При этом время распространения двух этих волн также одинаково и равно:

$$T = h_s/c_{l2} + h_s/c_{t2}, \quad (2.5)$$

где  $h_s$  – толщина образца,  $c_{l2}$  – скорость распространения продольной волны в образце,  $c_{t2}$  – скорость распространения сдвиговой волны в образце.

## 2.2 Вывод аналитических выражений для построения временной формы сигнала

В предыдущем параграфе были выполнены расчёты суммарных амплитудных коэффициентов отражения, прохождения и трансформации для каждой гармоники с лучевым параметром  $p$  плоских волн «P[SP]P» и «P[PS]P». Было показано, что углы падения, коэффициенты отражения, прохождения и трансформации для плоских волн однозначно определяются лучевым параметром  $p$  и параметрами сред.

Известно [122], что при лазерном возбуждении ультразвука в изотропной среде генератора возбуждается акустический импульс, каждая гармоника которого при Фурье разложении по плоским монохроматическим волнам имеет вид:

$$\tilde{V}_z = I_0 \tilde{f}(\omega) \tilde{H}(\mathbf{k}_\perp) \sum_m \mathcal{K}_m(\omega, \mathbf{k}_\perp) \quad (2.6)$$

где  $\tilde{V}_z$  – проекция Фурье-компоненты колебательной скорости частиц на ось  $z$  (рисунок 2.2),  $I_0$  – амплитуда значения интенсивности лазерного импульса,  $\tilde{f}(\omega)$  – Фурье-образ его временной огибающей.

Функция  $\tilde{H}(\mathbf{k}_\perp)$  есть пространственный Фурье-образ, определяемый распределением интенсивности в поперечном сечении оптического пучка. Для гауссова пучка радиусом  $a$  ( $H(\mathbf{r}_\perp) = \exp[-r_\perp^2/a^2]$ ,  $\mathbf{r}_\perp = \{x, y\}$ ) данная функция имеет вид  $\tilde{H}(\mathbf{k}_\perp) = \pi a^2 \exp[-k_\perp^2 a^2/4]$ ;  $\mathcal{K}_m(\omega, \mathbf{k}_\perp)$  – передаточная функция среды генератора, имеющая вид:

$$\mathcal{K}_m(\omega, \mathbf{k}_\perp) = \frac{\beta^*}{2\rho c_p} \frac{\alpha^2 - i\alpha \sqrt{k_L^2 - k_\perp^2}}{\alpha^2 + \sqrt{k_L^2 - k_\perp^2}} \quad (2.7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения лазерного излучения,  $k_l = \omega/c_l$ ,  $\beta$  – объемный коэффициент теплового расширения,  $\beta^* = K\beta/(\rho c_l^2) = \beta(1 - 4c_t^2/3c_l^2)$  –

эффективный объемный коэффициент теплового расширения,  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении.

При описании процесса распространения каждой гармоники задаваемой выражением (2.6), в образце и среде генератора необходимо учесть трансформацию мод и фазовый сдвиг. Поэтому выражение для проекции колебательной скорости  $\tilde{V}_z$  на ось  $z$  для каждой гармоники импульсов  $\omega$  продольной и сдвиговой волн, распространяющихся в образце, в среде может быть записано в виде:

$$\tilde{V}_z = \sum_m \tilde{V}_{z,m} = \Gamma I_0 \tilde{f}(\omega) \tilde{H}(\mathbf{k}_\perp) \sum_m \mathcal{K}_m(\omega, \mathbf{k}_\perp) W_m(p) e^{i\Phi_m(\omega, \mathbf{k}_\perp, z)}, \quad (2.8)$$

Здесь  $m$  - идентификатор акустической волны (моды),  $\Phi_m(z, \mathbf{k}_\perp)$  - фазовый сдвиг. Суммарный коэффициент  $W_m(p)$ , который является произведением коэффициентов прохождения, трансформации и отражения на всех границах, достигаемых волной.

Тогда временная форма записанных акустических сигналов может быть выражена так:

$$V_{z,m} = \Gamma I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{f}(\omega) e^{-i\omega t} \frac{d\omega}{2\pi} \iint_{-\infty}^{+\infty} \tilde{G}_m(\omega, \mathbf{k}_\perp, z) e^{i\mathbf{k}_\perp \cdot \mathbf{r}_\perp} \frac{d^2 \mathbf{k}_\perp}{(2\pi)^2}, \quad (2.9)$$

$$\tilde{G}_m(\omega, \mathbf{k}_\perp, z) = \mathcal{K}_m(\omega, \mathbf{k}_\perp) W_m(p) \pi a^2 \exp\left[-\frac{k_\perp^2 a^2}{4} + i\Phi_m(\omega, \mathbf{k}_\perp, z)\right], \quad (2.10)$$

Предполагая, что акустические пучки осесимметричны, мы можем записать:  $\mathcal{K}_m(\omega, \mathbf{k}_\perp) = \mathcal{K}_m(\omega, k_\perp)$  и  $\Phi_m(\omega, \mathbf{k}_\perp, z) = \Phi_m(\omega, k_\perp, z)$ , следовательно,  $\tilde{G}_m(\omega, \mathbf{k}_\perp, z) = \tilde{G}_m(\omega, k_\perp, z)$ . Вблизи акустической оси углы падения  $i$  и  $j$  малы, поэтому  $c_l p \sim \sin i \ll 1$  и  $c_t p \sim \sin j \ll 1$ , и мы можем аппроксимировать выражения для  $\mathcal{K}_m$ ,  $W_m$  и  $\Phi_m$ . Ряд Тейлора для  $z$ -компоненты волнового вектора содержит только четные степени  $p$ :

$$k_z = (k^2 - k_\perp^2)^{1/2} \approx k - \frac{k_\perp^2}{2k} + \mathcal{O}\left(\frac{k_\perp^2}{k^2}\right) = \frac{\omega}{c} \left(1 - \frac{1}{2}c^2 p^2\right) + \mathcal{O}(p^4) \quad (2.11)$$

Здесь  $k_z$ ,  $k$  и  $c$  могут относиться к продольным или сдвиговым волнам. Ряды Тейлора для  $\mathcal{K}_m$  и  $\Phi_m$  зависят от  $k_z$  и, следовательно, также содержат только четные степени числа  $p$ :

$$\mathcal{K}_m(\omega, k_\perp) = \mathcal{K}_m^{(0)}(\omega) + \mathcal{K}_m^{(2)}(\omega)p^2 + \mathcal{O}(p^4) \quad (2.12)$$

$$\Phi_m(\omega, k_\perp, z) = \omega\tau_m(z) - \frac{k_\perp^2 a^2}{4} \zeta_m(\omega, z) + \mathcal{O}(p^4) \quad (2.13)$$

Величины  $\tau_m(z)$  и  $\zeta_m(\omega, z)$  определяются параметрами каждой среды и скоростями упругих волн. Их значения приведены в таблице 2.3 – 2.4.

Ряд Тейлора для коэффициента отражения может содержать нечетные степени  $p$ :

$$W(p) = W_m^{(0)} + W_m^{(1)}p + W_m^{(2)}p^2 + \mathcal{O}(p^4) \quad (2.14)$$

Однако мы будем рассматривать только случаи, когда  $W_m^{(1)} = 0$ . Опуская члены  $\mathcal{O}(p^4)$ , мы можем получить следующее выражение для сигналов:

$$V_{z,m}(t, r_\perp, z) \approx I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{f}(\omega) e^{-i\omega(t-\tau_m)} \frac{d\omega}{2\pi} \iint_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{G}_m(\omega, k_\perp, z) e^{ik_\perp \cdot r_\perp} \frac{d^2 k_\perp}{(2\pi)^2} \quad (2.15)$$

$$\tilde{\mathcal{G}}_m(\omega, k_\perp, z) = [\mathcal{K}_m^{(0)} W_m^{(0)} + (\mathcal{K}_m^{(2)} W_m^{(0)} + \mathcal{K}_m^{(0)} W_m^{(2)})p^2] \pi a^2 \exp\left[-\frac{k_\perp^2 a^2 q_m}{4}\right] \quad (2.16)$$

Здесь  $q_m(\omega, z) = 1 + i\zeta_m(\omega, z)$ .

$$V_{z,m}(t, r_{\perp}, z) \approx I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{f}(\omega) \mathcal{G}_m(\omega, r_{\perp}, z) e^{-i\omega(t-\tau_m)} \frac{d\omega}{2\pi} \quad (2.17)$$

$$\tilde{\mathcal{G}}_m(\omega, r_{\perp}, z) = \left[ \frac{\mathcal{K}_m^{(0)} W_m^{(0)}}{q_m} + 4 \frac{\mathcal{K}_m^{(2)} W_m^{(0)} + \mathcal{K}_m^{(0)} W_m^{(2)}}{\omega^2 a^2 q_m^2} \left( 1 - \frac{r_{\perp}^2}{a^2 q_m} \right) \right] \exp \left[ -\frac{r_{\perp}^2}{a^2 q_m} \right] \quad (2.18)$$

Функции  $\tau_P$ ,  $\zeta_P$ ,  $W_P$  и  $\mathcal{K}_P$  для «Р» -волны, которая идет непосредственно к преобразователю, перечислены в таблице 2.3. Те же функции для акустических мод, которые имеют наименьшее время прохождения и могут использоваться для поиска акустической волны. Ряд Тейлора для коэффициентов отражения  $W_m(p)$  был рассчитан с использованием точных коэффициентов отражения и пропускания из [121].

Таблица 2.3. Параметры «Р» -волны.

$\tau(z)$	$\zeta(\omega, z)$	$W(p)$	$\mathcal{K}(\omega, k_{\perp})$
$-\frac{z}{c_l}$	$-\frac{z}{\ell_l}$	1	$\frac{\beta^*}{2\rho c_p} \frac{-\alpha^2 - i\alpha k_l}{\alpha^2 + k_l^2} + \mathcal{O}(p^2)$

В таблице 2.3  $\ell_l = \omega a^2 / (2c_l)$  - длина дифракции продольных волн в преобразователе.

Таблица 2.4. Параметры акустических мод, которые могут быть использованы для определения скорости продольных волн  $c_L^{(s)}$  в установке УДЛ-2М.

$m$	PP	P[PP]P	P[PPPP]P

$\tau_m(z)$	$-\frac{z}{c_l} + \frac{2h_g}{c_l}$	$-\frac{z}{c_l} + \frac{2h_g}{c_l} + \frac{2h_s}{c_l^{(s)}}$	$-\frac{z}{c_l} + \frac{2h_g}{c_l} + \frac{4h_s}{c_l^{(s)}}$
$\zeta_m(\omega, z)$	$-\frac{z}{\ell_l} + \frac{2h_g}{\ell_l}$	$-\frac{z}{\ell_l} + \frac{2h_g}{\ell_l} + \frac{2h_s}{\ell_l^{(s)}}$	$-\frac{z}{\ell_l} + \frac{2h_g}{\ell_l} + \frac{4h_s}{\ell_l^{(s)}}$
$W_m(p)$	$\frac{Z_l^{(s)} - Z_l}{Z_l^{(s)} + Z_l}$ $+O(p^2)$	$\frac{-4Z_l Z_l^{(s)}}{(Z_l^{(s)} + Z_l)^2}$ $+O(p^2)$	$4Z_l Z_l^{(s)} \frac{Z_l - Z_l^{(s)}}{(Z_l^{(s)} + Z_l)^3}$ $+O(p^2)$
$\mathcal{K}_m(\omega, k_\perp)$	$\frac{\beta^* \alpha^2 - i\alpha k_l}{2\rho c_p \alpha^2 + k_l^2}$ $+O(p^2)$		

В таблице 2.4  $\ell_l^{(s)} = k_l^{(s)} a^2 / 2 = \omega a^2 / (2c_l^{(s)})$  - дифракционная длина продольно волны в образце,  $Z_l = \rho c_l$  и  $Z_l^{(s)} = \rho^{(s)} c_l^{(s)}$  - акустические импедансы преобразователя и образца для продольных волн соответственно. Главный ненулевой член в  $W_m(p)$  для волн, представленных в таблице 2.4, равен  $W_m^{(0)}$ . Все остальные члены были опущены. Первый член в  $\tilde{G}_m$  пропорционален  $q^{-1} = (1 + i\zeta)^{-1} = \omega[\omega + 2i\alpha^{-2}(-zc_l + \dots)]^{-1} \propto i\omega$  в основном частотном лазерном ультразвуковом диапазоне, возбуждаемом с помощью лазерных импульсов наносекундной длительности. Следовательно, форма импульсов «Р [Р... Р] Р», которые всегда были продольными волнами, пропорциональна производной по времени исходной волной формы  $\mathcal{K}^{(0)}(\omega)$ . Следует отметить, что скорость продольных волн, рассчитанная по разнице времен прохождения волн «Р [PP] Р» и «Р [PPPP] Р», является более точной, чем скорость продольных волн, рассчитанная из разницы между временами прохождения волны «PP» и волны «Р [PP] Р».

Таблица 2.5. Параметры волны «P [PS] P + P [SP] P», которые могут быть использованы для определения скорости сдвиговых волн  $c_t^{(s)}$  в установке контактного лазерного ультразвука эхо-режима.

$m$	P[PS]P	P[SP]P
$\tau_m(z)$	$-\frac{z}{c_l} + \frac{2h_g}{c_l} + \frac{h_s}{c_l^{(s)}} + \frac{h_s}{c_t^{(s)}}$	
$\zeta_m(\omega, z)$	$-\frac{z}{\ell_l} + \frac{2h_g}{\ell_l} + \frac{h_s}{\ell_l^{(s)}} + \frac{h_s}{\ell_t^{(s)}}$	
$W_m(p)$	$16\mu^{(s)}Z_l \frac{c_t Z_l^{(s)} - c_l^{(s)} Z_l + 2(\mu - \mu^{(s)})}{(Z_l^{(s)} + Z_l)^2 (Z_t^{(s)} + Z_t)} p^2 + O(p^4)$	
$\mathcal{K}_m(\omega, k_\perp)$	$\frac{\beta^*}{2\rho c_p} \frac{\alpha^2 - i\alpha k_l}{\alpha^2 + k_l^2} + O(p^2)$	

В таблице 2.5  $\ell_t^{(s)} = k_t^{(s)} a^2 / 2 = \omega a^2 / (2c_t^{(s)})$  - дифракционная длина сдвига. волны в образце,  $Z_t = \rho c_t$  и  $Z_t^{(s)} = \rho^{(s)} c_t^{(s)}$  - акустические импедансы преобразователя и образца для сдвиговых волн соответственно. Главный ненулевой член в  $W_m(p)$  для волн, представленных в таблице 2.5, равен  $W_m^{(2)}$ , поскольку при нормальном падении продольной волны сдвиговая волна не генерируется. Амплитуды и время распространения волны «P [PS] P» и «P [SP] P» равны, поэтому комбинированная волна «P [PS] P + P [SP] P» регистрируется преобразователем. Интересно отметить, что хотя коэффициент преобразования продольной волны в сдвиговую волну равен нулю при нормальном падении, на акустической оси присутствует ненулевой акустический сигнал. Член сдвиговой волны пропорционален  $\omega^{-2} q^{-2} = [\omega + 2i\alpha^{-2}(-zc_l + \dots)]^{-2}$ . Таким образом, исходная форма волны  $\mathcal{K}^{(0)}(\omega)$  фильтруется нижними частотами с лоренц-подобным ядром.

Обычно исходная форма волны в настройке контактного лазерного ультразвука представляет собой монополярный импульс. Таким образом, импульс «P [PS] P + P [SP] P», который временно представлял собой сдвиговую волну внутри образца, также является монополярным импульсом, но с меньшей высокочастотной составляющей. Однако «P [P... P] P» -импульсы, которые всегда были продольными волнами, биполярны из-за дифракции. Следовательно, измерение времени пролета между экстремумами чисто продольных импульсов и максимумом импульса частично сдвиговой волны некорректно и может вносить систематическую ошибку.

### 2.3 Разработка алгоритма расчёта временной формы сигнала на основе аналитических выражений

С помощью полученных в подразделе 2.2 аналитических выражений для каждой гармоники лучевого вектора продольной и сдвиговой волн был написан код расчёта временной формы сигнала на языке Python с целью определения значения скоростей упругих волн. Идея данного алгоритма заключается в определении скоростей не по временам задержек импульсов продольных или сдвиговых волн, а по временной форме сигнала.

Разработка данного алгоритма была необходима для устранения влияния внешних факторов, таких как сила прижима ПЭП к поверхности образца, наличие достаточного или недостаточного количества контактной жидкости между плоскостью генератора и поверхностью образца, на качество построения временной формы сигнала и ошибку определения скоростей волн.

Алгоритм расчёта временной формы сигнала и определения по ней значений скоростей упругих волн представлен в таблице 2.6.

Таблица 2.6. Алгоритм расчёта временной формы сигнала и определения по ней значений скоростей упругих волн

№	Шаг	Задачи и операции
1	Считывание файла экспериментального сигнала	Считывание файла с экспериментальным сигналом
2	Обработка сигнала	Фильтрация сигнала с помощью супергауссовского [120] фильтра нижних частот с частотой среза 20 МГц
3	Анализ и разметка экспериментального сигнала	Выделение интервалов времени, в которые попадают импульсы «PP», «P[PP]P», «P[PS]P+ P[SP]P» и «P[PPPP]P» волн. Определение положений максимумов для «PP» и «P[PS]P+ P[SP]P» волн и минимумов для «P[PP]P» и «P[PPPP]P» волн. Расчёт значений $c_l$ и $c_t$ в исследуемой среде 2 на основе найденных положений максимумов и минимумов.
4	Подбор параметров среды 1	Подбор параметров генератора и призмы (плотность, скорости, толщина), длительность лазерного импульса, радиус пучка, коэффициент поглощения света в генераторе с целью совпадения расчетных импульсов «P» и «PP» волн с экспериментальными. Подбор параметров среды 1 достаточно сделать один раз, если используется один и тот же преобразователь для исследования всех последующих образцов.
5	Уточнение значений $c_l$ и $c_t$ в исследуемой среде 2	Уточнение осуществляется с помощью алгоритма минимизации Нелдера-Мида. Итерационно минимизируются отклонения положений максимумов для «PP» и «P[PS]P+ P[SP]P» волн и минимумов для «P[PP]P» и «P[PPPP]P» волн в экспериментальном сигнале и модельном сигнале, рассчитанном по формулам 2.8, 2.17 и 2.18. В качестве начального приближения используются значения $c_l$ и $c_t$ , найденные на этапе 3.

Данный расчёт удобен тем, что его возможно использовать как первое приближение для определения волновой формы при проведении экспериментов, так как ориентировочные значения скоростей известны для большинства материалов. Ниже на рисунке 2.3 представлены рассчитанные (модельные) аналитические временные формы сигналов для образца дюралюминия и доломита.

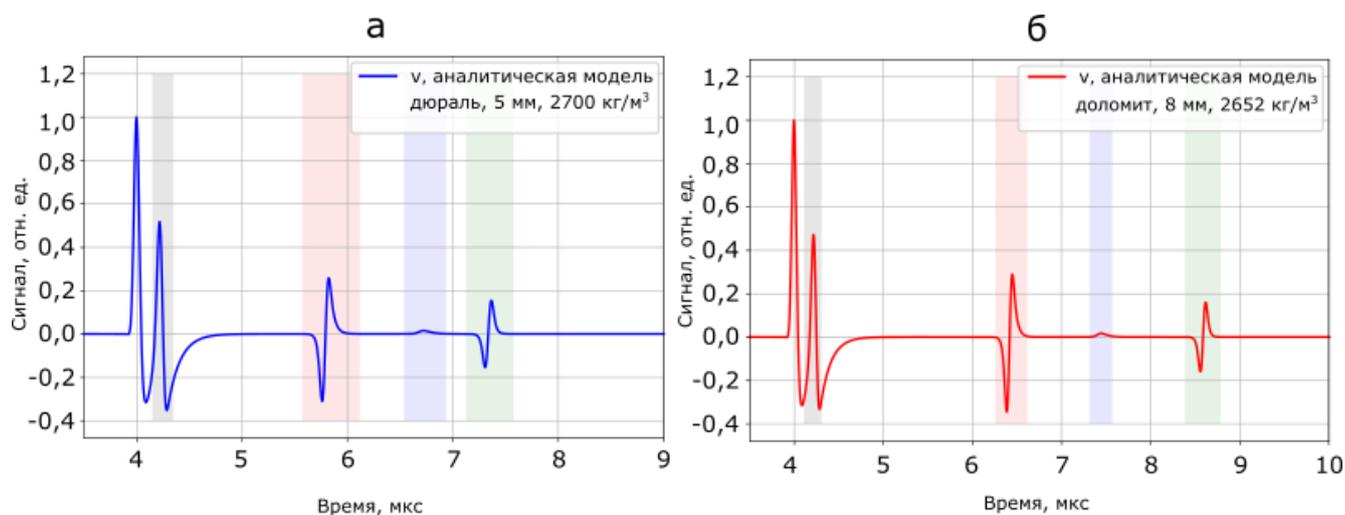


Рисунок 2.3 – Временные профили импульсов волн, построенные с помощью аналитической модели (а) дюралюминий и (б) доломит

#### 2.4 Верификация модельного сигнала, построенного с помощью оптимизационного алгоритма, в COMSOL Multiphysics

Верификация модельного сигнала, построенного с помощью оптимизационного алгоритма на основе аналитических выражений проводилась в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Методом конечных элементов был рассчитан временной профиль ультразвуковых импульсов в модельной задаче, в которой среда 1 преобразователя (совмещенные части преобразователя d и b, рисунок 2.2) предполагалась жидкой ввиду особенностей модуля Acoustics (Acoustic Structure Interaction, Acoustic Solid Transient). Геометрические характеристики и физические свойства сред модели приведены в таблице 2.7.

Граничные условия для генератора задавались как свободные, кроме 5 и 7 – они были заданы как акустически жесткие «sound hard». На границе 4 - границе жидкой и твёрдой сред была задана мультифизическая связка «Acoustic-Structure Boundary 1). Ось, на которую легли границы 3 и 1 – является осью симметрии (в соответствии с рисунком 2.4, Б). На данной оси (z) симметрии выделялась точка рассмотрения 8 «domain point probe 1» с координатами (0, 1,5).

Далее рассчитывалась сетка модели, размер элементов приведен в таблице 2.7, а ее вид представлен на рисунке 2.4, Г.

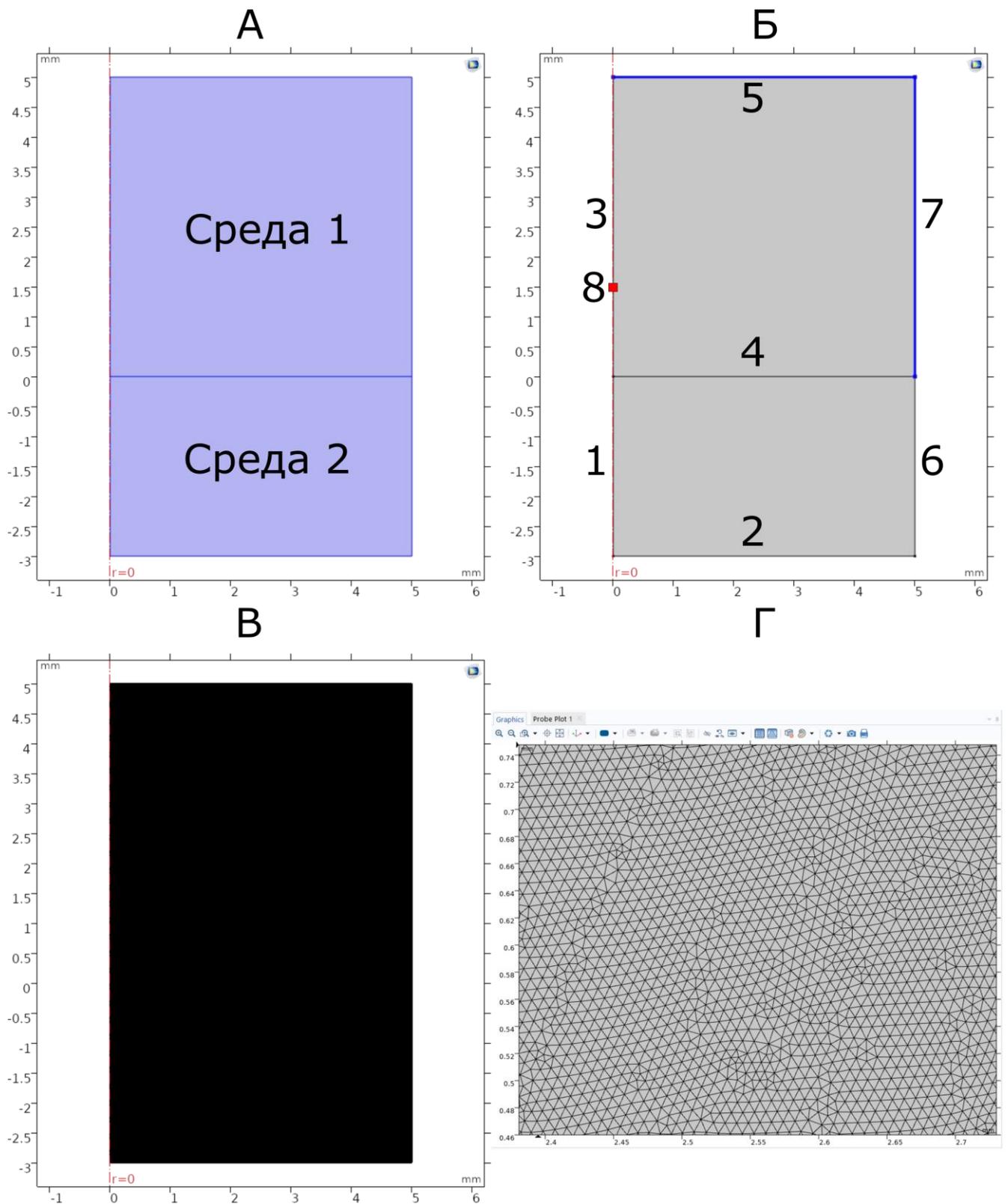


Рисунок 2.4 – Созданная модель с обозначением сред и подписанных границ

Таблица 2.7. Параметры расчётной модели в Comsol Multiphysics

№	Параметр, обозначение	Значение	Единица измерения
1	Толщина генератора, $h_{g1}$	0,3	мм
2	Толщина образца, $h_{s2}$	3	мм
3	Толщина призмы (плексигласа), $h_p$	5	мм
4	Ширина расчётной области вдоль $R$ , мм	5	мм
5	Скорость продольной волны в преобразователе, $c_{l1}$	2670	м/с
6	Скорость поперечной волны в преобразователе, $c_{t1}$	1110	м/с
7	Скорость продольной волны в образце, $c_{l2}$	6320	м/с
8	Скорость поперечной волны в образце, $c_{t2}$	3190	м/с
9	Плотность преобразователя, $\rho_1$	1200	кг/м <sup>3</sup>
10	Плотность образца, $\rho_2$	2790	кг/м <sup>3</sup>
11	Модуль сдвига преобразователя	формула 1.8	ГПа
12	Модуль сдвига образца	формула 1.8	ГПа
13	Динамический модуль упругости преобразователя, $E_{dyn1}$	формула 1.7	ГПа
14	Динамический модуль упругости образца, $E_{dyn2}$	формула 1.7	ГПа
15	Коэффициент Пуассона преобразователя, $\mu_1$	формула 1.9	
16	Коэффициент Пуассона преобразователя, $\mu_2$	формула 1.9	
17	Радиус пучка, $a$	1	мм
18	Коэффициент поглощения лазерного излучения, $\alpha$	200	см <sup>-1</sup>
19	Максимальный размер элемента сетки в среде преобразователя $h_{el1}$	$1/5\alpha$	м
20	Максимальный размер элемента сетки в среде образца $h_{el2}$	$h_{el1} \cdot \frac{c_{t2}}{c_{l1}}$	м
21	Переходной слой, $hh$	$5 \cdot h_{el1}$	м
22	Число Куранта-Фридрихса-Леви, $CFL$	0,3	
23	Шаг по времени, $t_{step}$	$CFL \cdot \frac{h_{el1}}{c_{l1}}$	с
24	Шаг по времени, $t_{final}$	5	мкс
25	Шаг по времени, $t_{res.step}$	5	нс
26	$z_{sensor}$	1,5	мм

Термоупругие напряжения, возникшие в результате поглощения лазерного излучения, моделировались в виде начальных условий. Генератор является частью жидкой среды 1, для которой в модуле «Pressure Acoustics, Transient» возможно задание начального распределения давления. Оно было задано в виде:

$$p(r, z, t = 0) = e^{-r^2/a^2} e^{\alpha(z-h_g)} W(z) \quad (2.19)$$

где  $W(z)$  – сглаженная оконная функция на основе функции ошибок, равная 1 внутри генератора и 0 вне него.

Для среды 2 (образца) задавались нулевые начальные условия (смещения и скорости). Далее был запущен расчёт, который занял порядка 14 часов на рабочей станции HP Z2 с учетом заданных параметров модели.

Итогом данного расчёта были построенные карты распределения давления в генераторе и призме из плексигласа и ротора поля смещений в образце (рисунки 2.5 и 2.6). Поле смещений  $\mathbf{u}$  в образце можно представить в виде суммы потенциальной составляющей и вихревой составляющей:  $\mathbf{u} = \nabla\varphi + \nabla \times \boldsymbol{\psi}$ . Потенциальная составляющая  $\nabla\varphi$  соответствует продольным волнам. Вихревая составляющая  $\nabla \times \boldsymbol{\psi}$  – поперечным. Для того, чтобы отобразить только сдвиговые волны, на картах строилось распределение -компоненты ротора поля смещений:

$$(\nabla \times \mathbf{u})_\varphi = \left( \underbrace{\nabla \times \nabla\varphi}_{=0} + \nabla \times \nabla \times \boldsymbol{\psi} \right)_\varphi = (\nabla \times \nabla \times \boldsymbol{\psi})_\varphi. \quad (2.20)$$

На рисунке 2.5 представлены (а) вызванное начальное распределение давления при термоупругом эффекте в слое генератора в момент времени 0 мкс. Распространение давления в различных направлениях, верхнее распределение давления в слое генератора, формирующее зондирующий импульс (в соответствии с рисунком 2.2 волна  $P_0$ ) и нижнее распределение давления в слое генератора – волна  $P_{10}$ ) – рисунок 2.5, Б и В. Распределения давления и ротора

поля смещений в околограничной зоне – трансформация продольной волны на границе в  $S_2$  и в  $P_2$  и ее распространение (рисунок 2.5, Г, Д и Е).

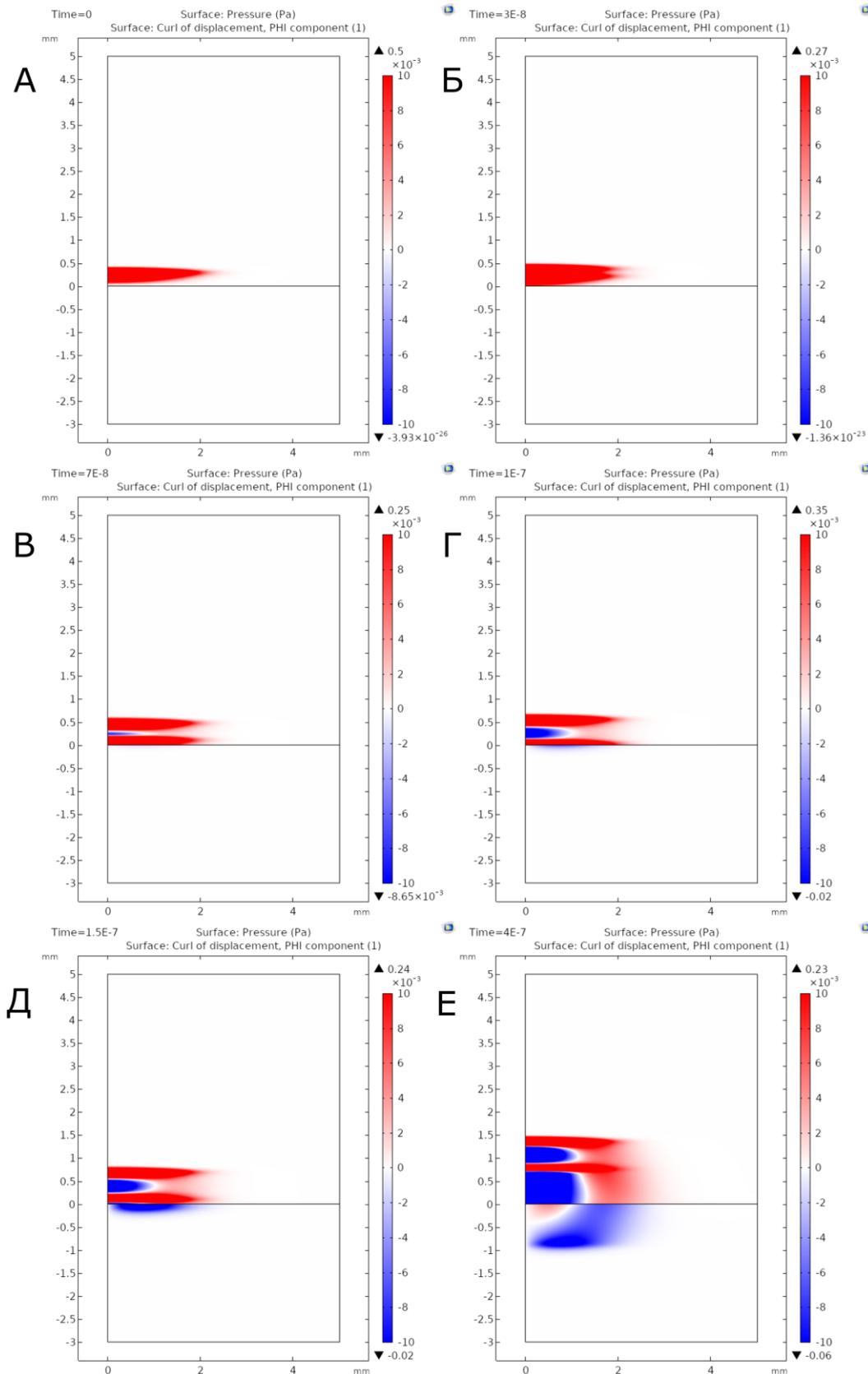


Рисунок 2.5 – Карты распределения давления в среде 1 – преобразователе (генераторе и призме из плексигласа и ротора поля смещений в среде2 – образце

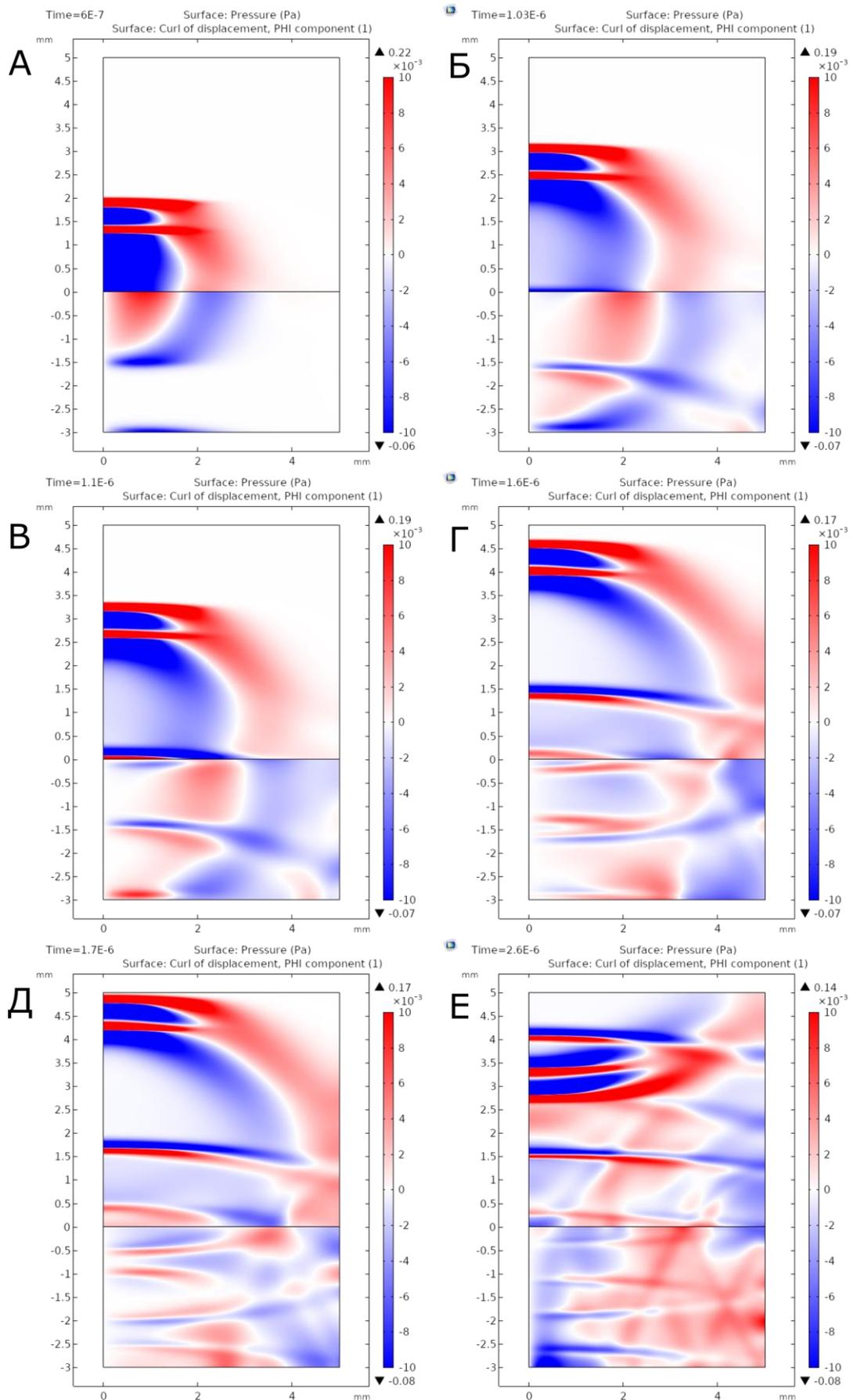


Рисунок 2.6 – Карты распределения давления в среде 1 – преобразователе (генераторе и призме из плексигласа) и ротора поля смещений в среде 2 – образце

Полученный при моделировании в COMSOL Multiphysics модельный временной сигнал (изменение давления от времени в модельных средах преобразователя и образца) представлен на рисунке 2.7.

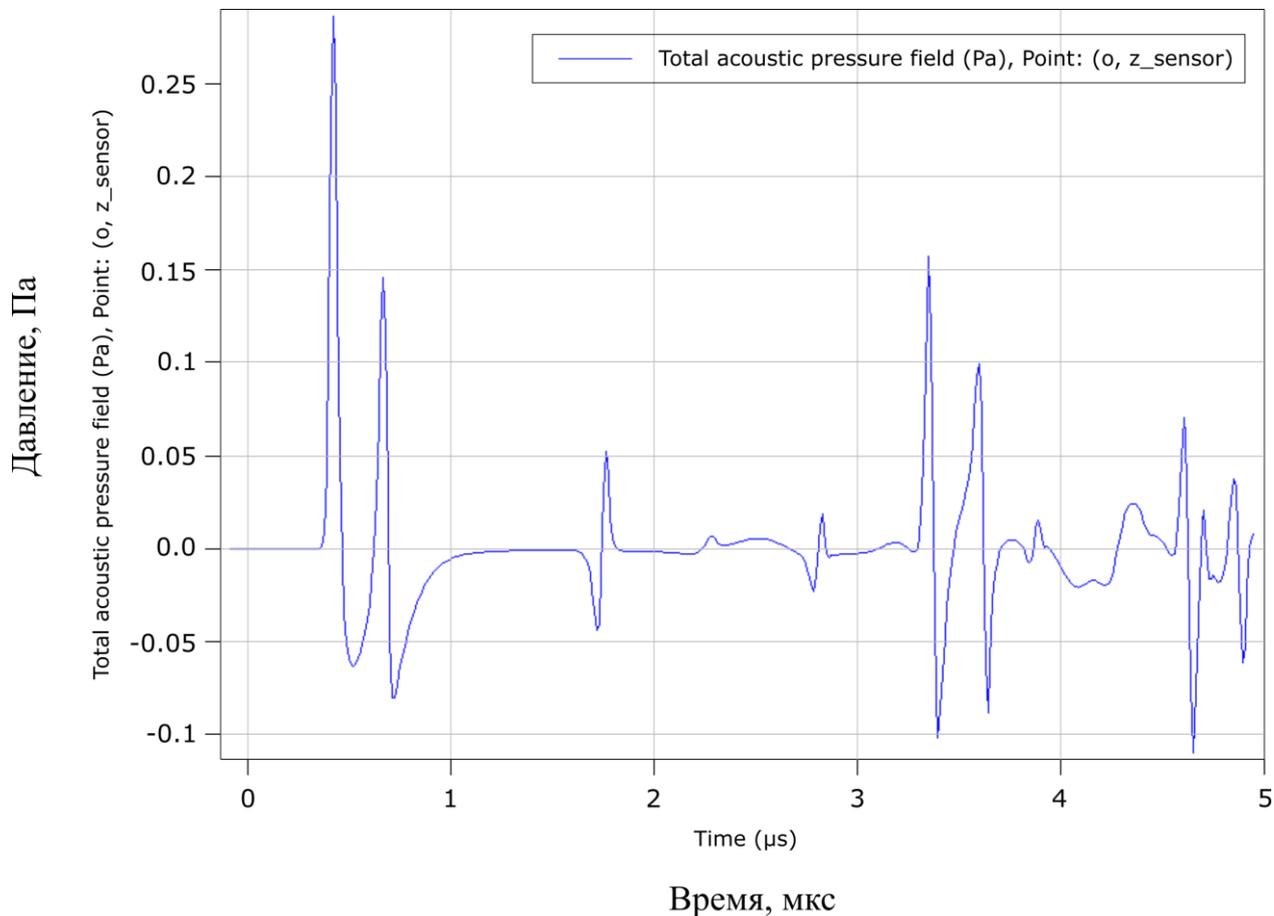


Рисунок 2.7 – Полученный при моделировании в COMSOL Multiphysics временной профиль сигнала (изменение давления от времени)

На рисунке 2.8 приведены нормированные временные профили импульсов продольных волн в среде преобразователя в точке  $z = 1,5$  мм, полученные в COMSOL Multiphysics и с помощью формул (2.17) и (2.18).

При расчёте по перечисленным формулам параметры среды образца подбирались путём минимизации разницы между временами прихода минимумов волн «P[PP]P» и «P[PPPP]P» и максимумов волны «P[PS]P + P[SP]P» для сигналов, полученных в COMSOL Multiphysics, и сигнала, рассчитанного по формулам (2.17) и (2.18) с учетом, что  $\tilde{V}_z = \sum_m \tilde{V}_{z,m}$ .

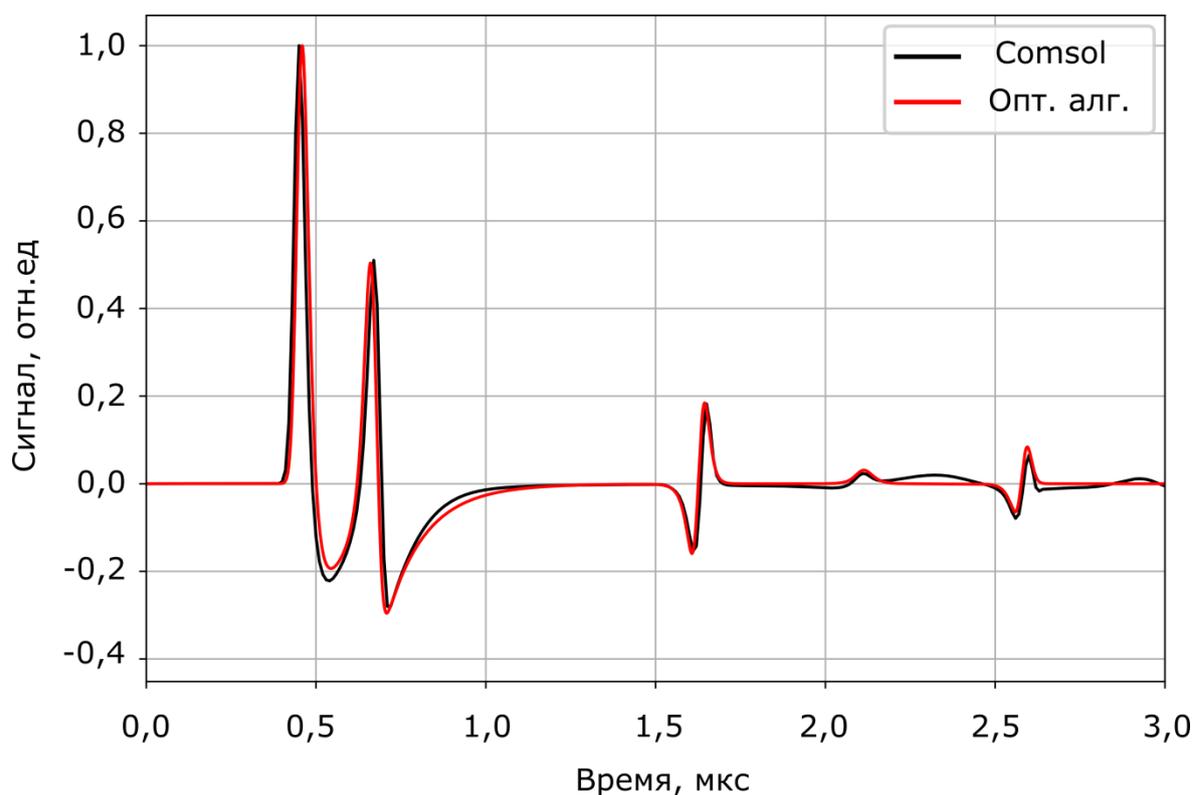


Рисунок 2.8 – Сравнение временных профилей импульсов продольных волн в среде преобразователя и среде образца (чёрная линия – результат моделирования сигнала в COMSOL Multiphysics, красная линия – результат расчёта сигнала по формулам (2.17) и (2.18))

На рисунке 2.4 видно качественное и количественное совпадение результатов конечно-элементного моделирования и разработанной аналитической модели.

Аналитическая кривая (красная) построена для следующих подобранных автоматически скоростей продольных и сдвиговых волн:  $c_l = 6\,321$  м/с,  $c_t = 3\,191$  м/с, что в пределах 1 % совпадает с заложенными в модель значениями.

## 2.5 Выводы.

Таким образом, в данном разделе:

- показано, что для каждого значения лучевого параметра падающей продольной волны на границы раздела сред возникающие сдвиговые волны приходят в одну и ту же точку синфазно с одинаковыми амплитудами [124];
- получены аналитические выражения для амплитуд продольной и сдвиговой волн при каждом значении лучевого параметра, необходимые для дальнейших расчётов временной формы сигнала для определения скоростей волн;
- разработан *оптимизационный алгоритм расчёта значений скоростей упругих волн на основе модельной временной формы сигнала*;
- проведена верификация модельного сигнала, построенного с помощью оптимизационного алгоритма в COMSOL Multiphysics;
- установлено, что модельный сигнал имеет качественное и количественное совпадение с сигналом, смоделированным в COMSOL Multiphysics.

## ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОГО ОПТИМИЗАЦИОННОГО АЛГОРИТМА РАСЧЁТА СКОРОСТЕЙ УПРУГИХ ВОЛН

### 3.1 Апробация оптимизационного алгоритма на модельных образцах

#### 3.1.1 Подготовка модельных образцов

С целью экспериментальной апробации разработанного оптимизационного алгоритма расчёта скоростей упругих волн были подготовлены образцы стекла и дюралюминия. Данные образцы являются «модельными» ввиду заранее известных их свойств, высокой степени однородности и небольшой толщины. Образцы горных пород и минералов аналогичной толщины будут апробироваться в работе в дальнейшем.

Все модельные образцы были прямоугольной параллелепипедной или цилиндрической формы, коэффициент вариации толщины некоторых образцов не превышал 1,86%.

Каждый из образцов для определения его плотности был взвешен на электронных весах с точностью измерения массы до 0,01 г. Для измерения геометрических параметров использовался микрометр с точностью измерения длины 0,01 мм. Значение толщины образца определялось по 4-5 измерениям толщины в разных точках по образцу. Фотографии образцов приведены на рисунке 3.1. Значения некоторых параметров модельных образцов-пластин представлены в таблице 3.1.

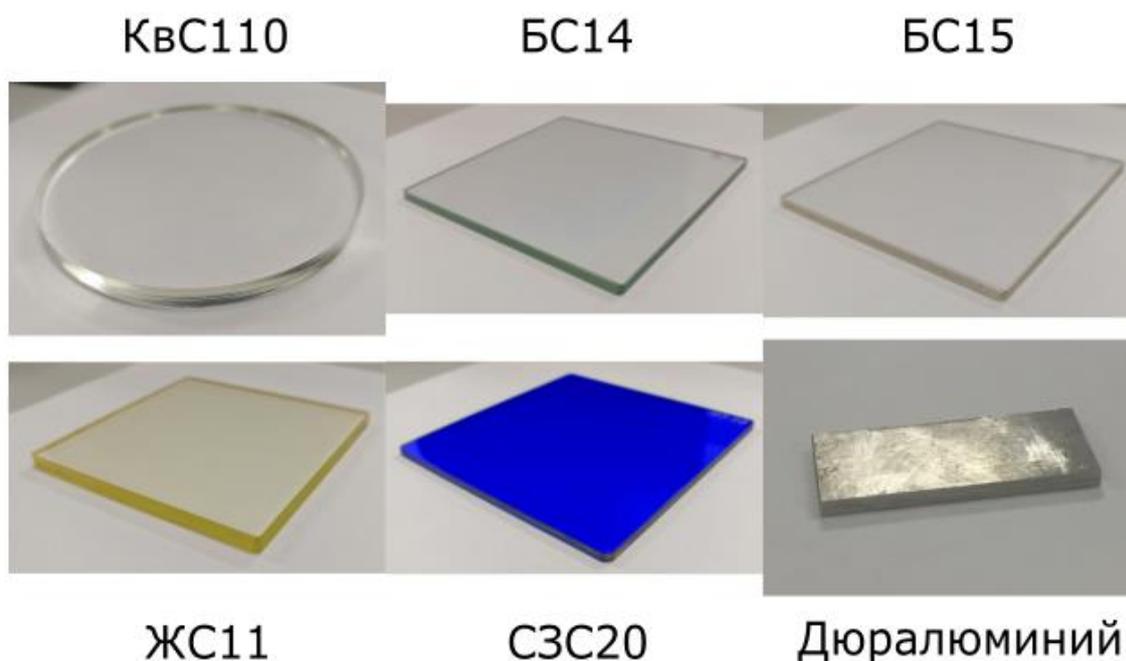


Рисунок 3.1 – Фотографии модельных образцов

Таблица 3.1. Сводная таблица параметров модельных образцов-пластин.

№	Наименование образца	Толщина $h_s$ , мм	Объем, мм <sup>3</sup>	Масса, г	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
1	Стекло КвС110 (прозрачное)	7,315±0,059	46560,40	105,22	2 260
2	Стекло БС14 (прозрачное)	3,057±0,020	19764,90	60,68	3 070
3	Стекло БС15 (прозрачное)	3,219±0,015	20577,10	47,87	2 326
4	Стекло ЖС11 (желтоватое)	5,217±0,017	33685,12	88,34	2 623
5	Стекло СЗС20 (синее)	2,820±0,041	18096,87	40,83	2 256
6	Дюралюминий	4,991±0,010	12057,92	33,40	2 770

Стекло КвС110 (прозрачное) – единственный модельный образец круглой формы.

Ошибка толщины образцов рассчитывалась как отношение стандартного отклонения к среднему значению локальных измерений и обуславливает перепад толщины образца в точках измерения.

Ввиду дальнейшего частого сравнения результатов, полученных с помощью различных режимов работы и методов ЛУД, имеет смысл ввести определения, которые будут использоваться.

«Оптимизационный эхо-метод» – это метод определения скоростей упругих волн на основе разработанного оптимизационного алгоритма.

«Эхо-метод» – метод классического определения скоростей упругих волн по временным задержкам различных типов волн и толщине образца с помощью эхо-режима ЛУД.

«Теневой метод» – метод определения значений скоростей по временным задержкам различных типов волн и толщине образца с помощью иммерсионного теневого режима ЛУД.

### 3.1.2 Определение динамических модулей упругости модельных образцов с помощью эхо-метода и оптимизационного эхо-метода

Измерение скоростей упругих волн в модельных образцах с помощью эхо-режима ЛУД производилось в тех же точках, где производилось и локальное измерение толщины (четыре точки).

Сравнение волновых форм сигналов, полученных экспериментально с использованием установки УДЛ-2М и рассчитанных с помощью оптимизационного алгоритма представлены на рисунке 3.2, а рассчитанные упругие характеристики приведены в таблице 3.2.

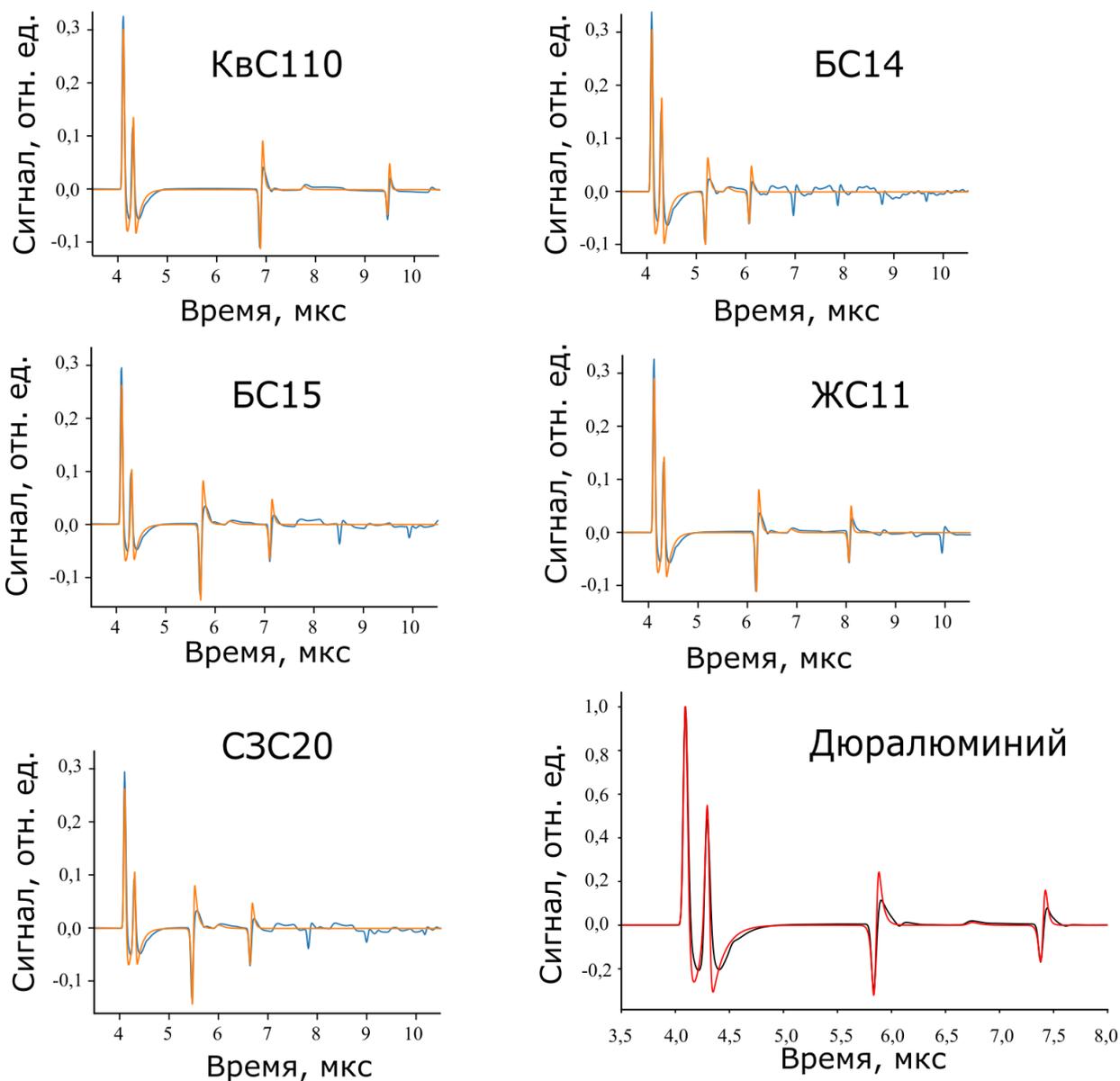


Рисунок 3.2 – Сравнение экспериментального сигнала с модельной временной формой сигнала для различных модельных образцов

Расчёт динамических упругих модулей производится по формулам:

$$E_{dyn} = \rho C_t^2 \frac{3C_l^2 - 4C_t^2}{C_l^2 - C_t^2} \quad (3.1)$$

$$\mu = \frac{C_l^2 - 2C_t^2}{2C_l^2 - 2C_t^2} \quad (3.2)$$

где  $\rho$  – плотность образца,  $E_{dyn}$  – динамический модуль упругости,  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Экспериментальный метод определения скоростей волн в эхо-режиме основан на оценке временной задержки. Предполагая, что разности между временными положениями максимумов или минимумов акустических импульсов равны временам распространения волн, справедливы следующие выражения:

$$C_l = 2h_s (T_{P[PPPP]P}^{min} - T_{P[PP]P}^{min})^{-1} \quad (3.3)$$

$$C_t = ([T_{P[PS]P+P[SP]P}^{max} - T_{PP}^{max}]h_s^{-1} - C_l^{-1})^{-1} \quad (3.4)$$

где  $T_{P[PPPP]P}^{min}$  – время регистрации импульса продольной волны по минимуму (2 донного сигнала),  $T_{P[PP]P}^{min}$  – время регистрации импульса продольной волны по минимуму (1 донного сигнала),  $T_{P[PS]P+P[SP]P}^{max}$  – время регистрации импульса сдвиговой волны по максимуму,  $T_{PP}^{max}$  – время регистрации импульса продольной волны, отразившейся от поверхности (поверхностного сигнала). Все обозначения представлены в соответствии с обозначениями на схеме рисунка 2.2.

Таблица 3.2. Рассчитанные значения скоростей упругих волн.

№	Наименование образца	Эхо-метод		Оптимизационный эхо-метод	
		$C_l$ , м/с	$C_t$ , м/с	$C_l$ , м/с	$C_t$ , м/с
1	Стекло КвС110 (прозрачное)	5606±2	3279±1	5631±1	3359±2
2	Стекло БС14 (прозрачное)	6795±5	3229±15	6870±12	3473±20
3	Стекло БС15 (прозрачное)	4547±3	2371±9	4580±6	2508±10
4	Стекло ЖС11 (желтоватое)	5523±3	3098±6	5550±3	3207±7
5	Стекло СЗС20 (синее)	4816±6	2427±10	4857±7	2656±16
6	Дюралюминий	6523±18	3012±19	6472±11	3073±8

Ошибка скорости волн рассчитывалась как стандартное отклонение значений скоростей, определенных локально в разных точках по поверхности модельного образца.

Далее на основе определенных значений скоростей были рассчитаны значения ДМУ модельных образцов.

Расчёт погрешности косвенного измерения проводился согласно [125]. Важно отметить, что рассчитываемый параметр (динамический модуль упругости) по формуле (3.1) зависит от определенных значений скоростей и плотности, которые являются также косвенными измерениями.

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial C_l} \cdot \Delta C_l\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial C_t} \cdot \Delta C_t\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \rho} \cdot \Delta \rho\right)^2} \quad (3.6)$$

где

$$\frac{\partial E}{\partial C_t} = -\frac{8C_t^3 \rho}{C_l^2 - C_t^2} + \frac{2C_t(3C_l^2 - 4C_t^2)\rho}{C_l^2 - C_t^2} + \frac{2C_t^3(3C_l^2 - 4C_t^2)\rho}{(C_l^2 - C_t^2)^2}, \quad \frac{\partial E}{\partial C_l} = \frac{6C_l C_t^2 \rho}{C_l^2 - C_t^2} - \frac{2C_l C_t^2(3C_l^2 - 4C_t^2)\rho}{(C_l^2 - C_t^2)^2} \text{ и } \frac{\partial E}{\partial \rho} = \frac{C_t^4(3C_l^2 - 4C_t^2)^2}{(C_l^2 - C_t^2)^2}$$

Рассчитанные в соответствии с формулой 3.6 значения ДМУ модельных образцов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Рассчитанные упругие характеристики модельных образцов с помощью эхо методов.

№	Наименование образца	Эхо-метод			Оптимизационный эхо-метод		
		Модуль Юнга, ГПа	Модуль сдвига, ГПа	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, ГПа	Модуль сдвига, ГПа	Коэффициент Пуассона
1	Стекло КвС110 (прозрачное)	60,3±1,7	24,3±0,9	0,24	62,4±1,8	25,5±1,0	0,22
2	Стекло БС14 (прозрачное)	86,7±1,9	32,0±1,1	0,35	98,4±2,2	37,0±1,2	0,33
3	Стекло БС15 (прозрачное)	34,3±0,5	13,1±0,3	0,31	37,6±0,9	14,6±0,4	0,29
4	Стекло ЖС11 (желтоватое)	64,0±1,3	25,2±0,8	0,27	67,4±1,7	27,0±0,7	0,25
5	Стекло СЗС20 (синее)	35,3±0,6	13,3±0,4	0,33	41,0±1,0	15,2±0,5	0,32
6	Дюралюминий	68,6±0,9	26,2±1,0	0,35	70,9±1,3	26,2±1,2	0,35

Далее была проведена *дополнительная* верификация полученных значений скоростей упругих волн в модельных образцах с помощью теневого метода. Для этого использовалась установка Геоскан-02МУ.

3.2 Теневой иммерсионный режим лазерной ультразвуковой диагностики с применением установки Геоскан-02МУ.

Установка лазерной ультразвуковой диагностики Геоскан-02МУ предназначена для акустических исследований образцов различных материалов. Принцип работы основан на иммерсионном методе режима проходящих волн. В работе использовался волоконный Nd: YAG-лазер с модуляцией добротности (длина волны 1064 нм, энергия импульса 100 мкДж, длительность импульса 7,5 нс, частота повторения импульсов 1 кГц, LCM-DTL-324QT, Laser-Export Co.Ltd, Россия). Акустические волны регистрировались широкополосным пьезоэлектрическим пленочным преобразователем из ПВДФ, приклеенным к акриловой основе. Сигналы от преобразователя были предварительно усилены, оцифрованы (частота дискретизации 100 МГц, разрешение 12 бит) и отправлены

на персональный компьютер для усреднения по нескольким лазерным импульсам и дальнейшего анализа. Основные узлы установки представлены на фото и подписаны (рисунок 3.3).

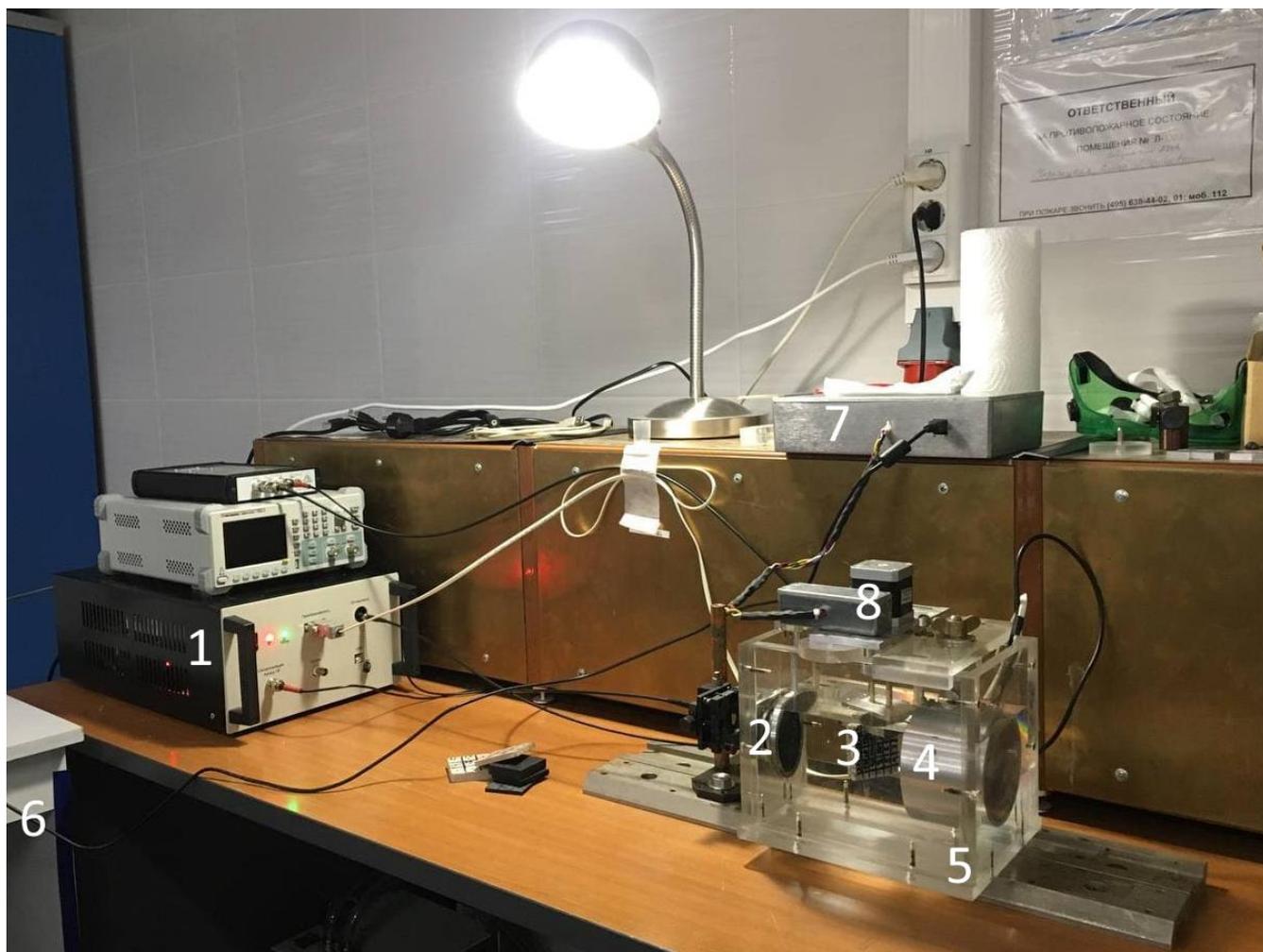


Рисунок 3.3 – Фотография установки Геоскан-02МУ, работающей в теновом иммерсионном режиме, основные узлы: 1 – блок с лазерным источником Nd:Yag и аналого-цифровым преобразователем, 2 – генератор, 3 – образец, закрепленный в зажимном устройстве поворотной оси, 4 – пьезоприемник, 5 – кювета с дистиллированной водой, 6 – кабель, ведущий к компьютеру для обработки данных, 7 – микроконтроллер и блок питания, 8 – шаговый двигатель, позволяющий управлять поворотом образца

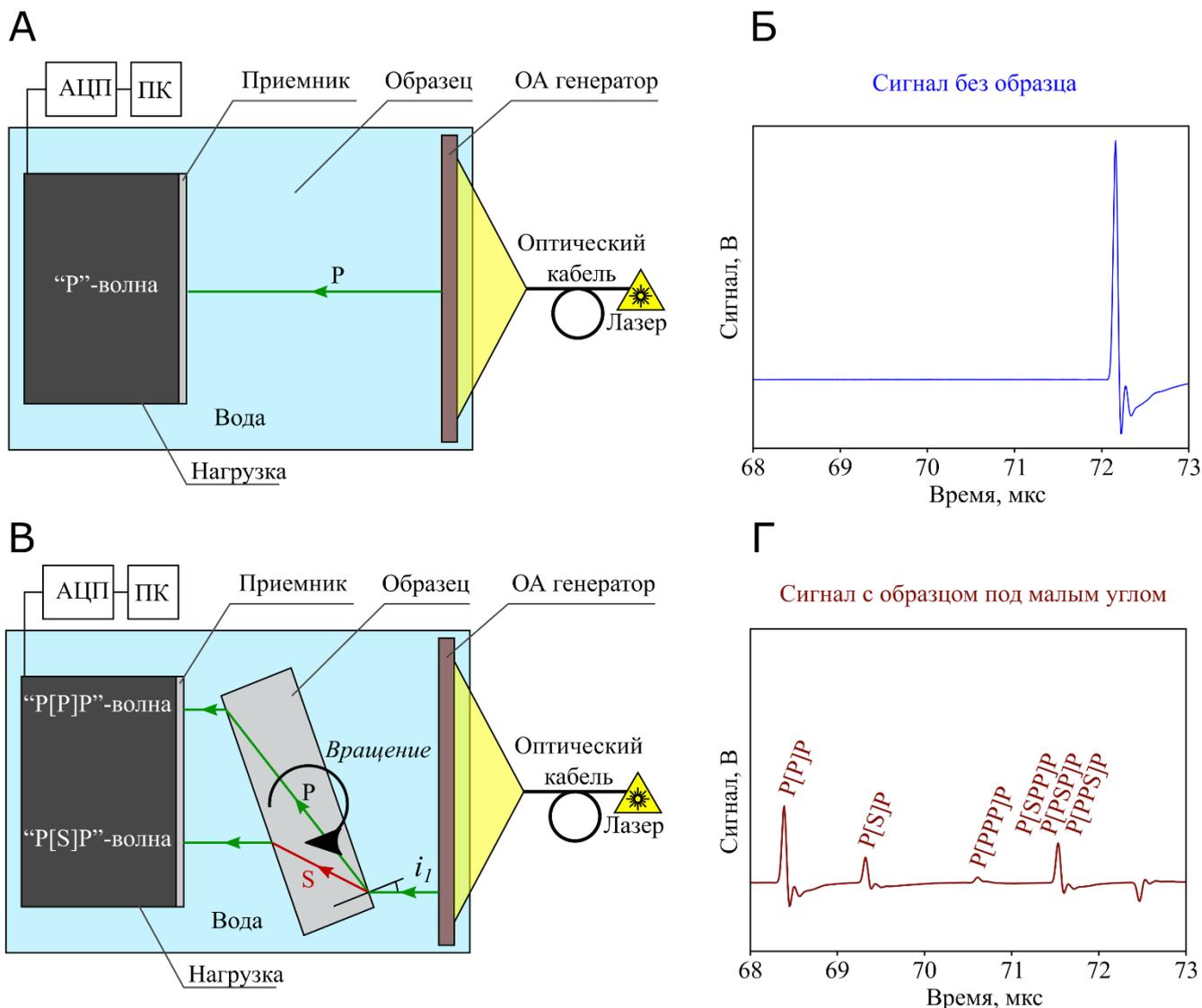


Рисунок 3.4 – Схема экспериментальной лазерной ультразвуковой иммерсионной установки, работающей в теновом-режиме без образца и с образцом (слева, А и В) и типичные формы сигналов, зарегистрированные экспериментально (справа, Б и Г). Б - форма сигнала, записанная без образца в кювете (синий цвет), Г - аннотированная форма сигнала с образцом кварцевого стекла, зафиксированным на угол  $i_1 \approx 8,1^\circ$  (коричневый цвет).

На рисунке 3.4 показаны типичные формы сигналов, зарегистрированные экспериментально с образцом и без него.

Поскольку скорость продольных и сдвиговых волн в модельных образцах (стекла и дюралюминий) превышала скорость звука в воде, акустические импульсы, проходящие через образец, приходили раньше, чем импульс, который проходил через воду без образца. Можно было четко идентифицировать

отдельные импульсы (волны «P [P] P», «P [S] P» и множественные реверберации, такие как «P [PPP] P» и т.д.), соответствующие продольным и сдвиговым волнам.

Например, волна «P [S] P» распространялась от ОА генератора к образцу через воду в виде продольной волны, затем она преобразовывалась в сдвиговую волну на передней поверхности образца и, наконец, преобразовывалась обратно в продольную волну на границе «задняя поверхность образца – вода» и далее распространялась к приемнику.

Количество указанных типов волн в квадратных скобках нечетное в рамках работы теневого режима, потому что ОА генератор и приемник расположены на противоположных сторонах образца (в отличие от обозначений типов волн при работе в эхо-режиме, где волны в образце проходили 2 раза из-за чего в квадратных скобках было четное количество типов волн).

### 3.2.1 Автоматизация установки Геоскан-02МУ для проведения массовых испытаний

В целях проведения автоматизации отдельных узлов установки были осуществлены следующие работы:

1. Установка шагового двигателя поворотной оси, на конце которой установлено разработанное зажимное устройство для закрепления исследуемого образца;
2. Написание программы микроконтроллера, предназначенного для управления двигателем поворотной оси УНУ ГЕОСКАН-02МУ, которая позволяла с точностью до 1 микрошага (в 360° (полном обороте вокруг оси) 3200 микрошагов) поворачивать образец.

В соответствии с программой микроконтроллер ожидает команд с ЭВМ, поступающих по последовательному интерфейсу, затем декодирует и исполняет их. Программа позволяет осуществить следующие действия:

- поиск «нулевой точки»;

- поворот шагового двигателя на заданное количество микрошагов;
- установку шагового двигателя в положение, соответствующее заданному количеству микрошагов от «нулевой точки»;
- запрос текущего угла поворота и состояния микроконтроллера: «ожидание», «движение» или «поиск нулевой точки».

Тип реализующей ЭВМ: 8-битный микроконтроллер Atmel AVR ATmega328. Язык программирования для программы: C++. Объем кода составил 8 Кб.

Данный код управления микроконтроллером был запатентован [126], патент приведен в *Приложении А* к диссертации.

### 3.2.2 Разработка алгоритма работы с установкой Геоскан-02МУ

Алгоритм работы следующий:

1. Кювета заполняется водой (желательно дистиллированной и оставляется на некоторое время для достижения температурного равновесия в том числе с целью избавления от пузырьков растворенного газа в ней);
2. Подключается лазер, наконечник световода располагается так, чтобы ширина лазерного луча на генераторе превышала 3 см (это необходимо, поскольку образец должен располагаться в пределах перетяжки акустического пучка, где волны можно было бы считать плоскими);
3. Все узлы системы юстируются с целью получения качественного сигнала. А именно ОА-генератор, приемник, наконечник волокна, подающего лазерный импульс настраиваются так, чтобы акустический импульс, проходящий в воде напрямую от генератора к приемнику имел максимальную амплитуду, самую короткую продолжительность, минимальное время прохождения и стабильную форму импульса;
4. Измеряется скорость акустической продольной волны в воде без образца  $c_w$  и время распространения акустического импульса  $T_w$ ;

5. Далее в зажимное устройство (по типу миниатюрных тисков) устанавливается подготовленный образец исследуемого материала, и помещается между генератором и приемником с целью вращения до тех пор, пока продольная волна почти не исчезала из-за полного внутреннего отражения. Таким образом определялся максимальный угол поворота образца относительно параллели и критические углы;
6. Образец вращают и регистрируют формы сигналов в каждом угловом положении  $i_1$ .

Ниже приведено более подробное объяснение расчёта значения скорости волны в воде через определенные значения времени регистрации сигналов при каждом относительном положении приемника. Экспериментальные значения времен регистрации импульсов продольной волны в воде и расстояние от границы кювета до приемника (относительное положение приемника) приведены в таблице 3.4

Таблица 3.4. Значения времен регистрации импульсов продольной волны в воде и относительного расстояния от границы кювета до приемника.

№ положения приемника	Время сигнала продольной волны, мкс	Относительное положение приемника, мм	Амплитуда сигнала, В
1	18,250	100,75	0,136
2	27,685	114,85	0,129
3	40,898	134,40	0,121
4	59,326	161,15	0,113
5	73,193	181,70	0,107

Алгоритм определения значения скорости упругой продольной волны в воде был следующим:

1. Генератор находится в статичном положении при всех регистрациях волновых форм с помощью приемника, далее положение приемника  $h_i + h_0$  относительно границы кюветы (соответственно, и генератора тоже) увеличивали;

2. При каждом положении приемника регистрировалась волновая форма (таких волновых форм было зарегистрировано пять, они приведены на рисунке 3.5. А-Д, где Е – все временные формы сигналов при разных положениях приемника № 1, 2, 3, 4 и 5 в соответствии с рисунком 3.5. Ж);

3. Время  $T_i$  распространения волны при каждом относительном положении приемника  $h_i + h_0$  можно выразить как  $\frac{h_i+h_0}{c_w}$ , то есть  $\frac{h_i+h_0}{c_w} = T_i$ ,

4. Данное выражение легко выразить в виде линейной функции  $y = kx + b$ , а именно  $T_i + T_0 = \frac{1}{c_w} h_i$

5. Далее с помощью метода наименьших квадратов найдем значения  $k = 1/c_w$  (то есть скорость) и  $b = -T_0 = h_0/c_w$  (смещение).

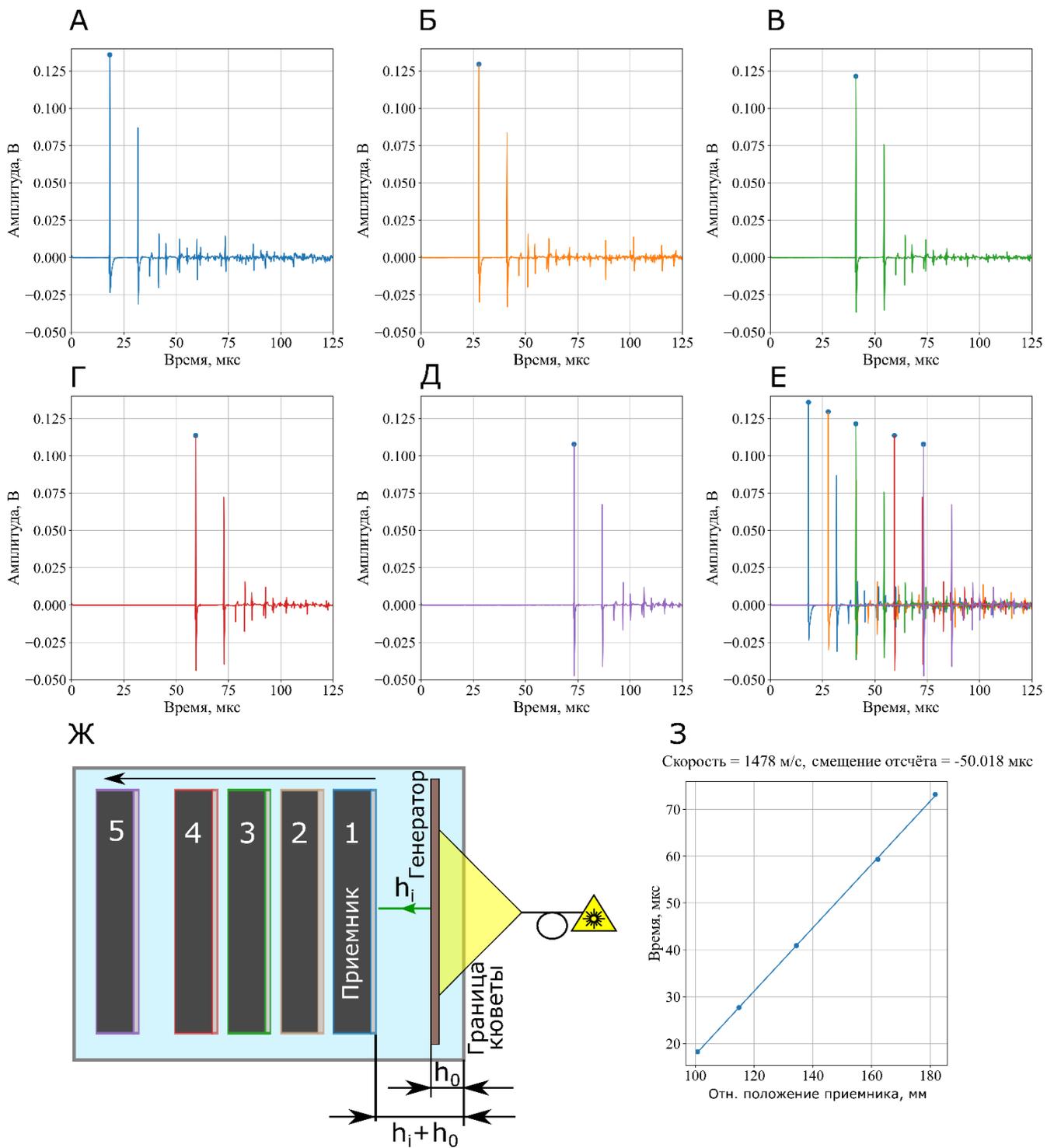


Рисунок 3.5 – Волновые формы сигналов без образца. А-Д- отдельно зарегистрированные импульсы продольной волны без образца, Е - волновые формы сигналов при разных положениях приемника № 1, 2, 3, 4 и 5, представленных на схеме Ж. З – график зависимости времени регистрации импульса продольной волны приемником от его относительного положения

На рисунке 3.4 было показано, что форма импульса волн «P [P] P» и «P [S] P» почти такая же, как у эталонного сигнала, записанного без образца. Подробная схема распространения волн в образце представлена на рисунке 3.6 ниже.

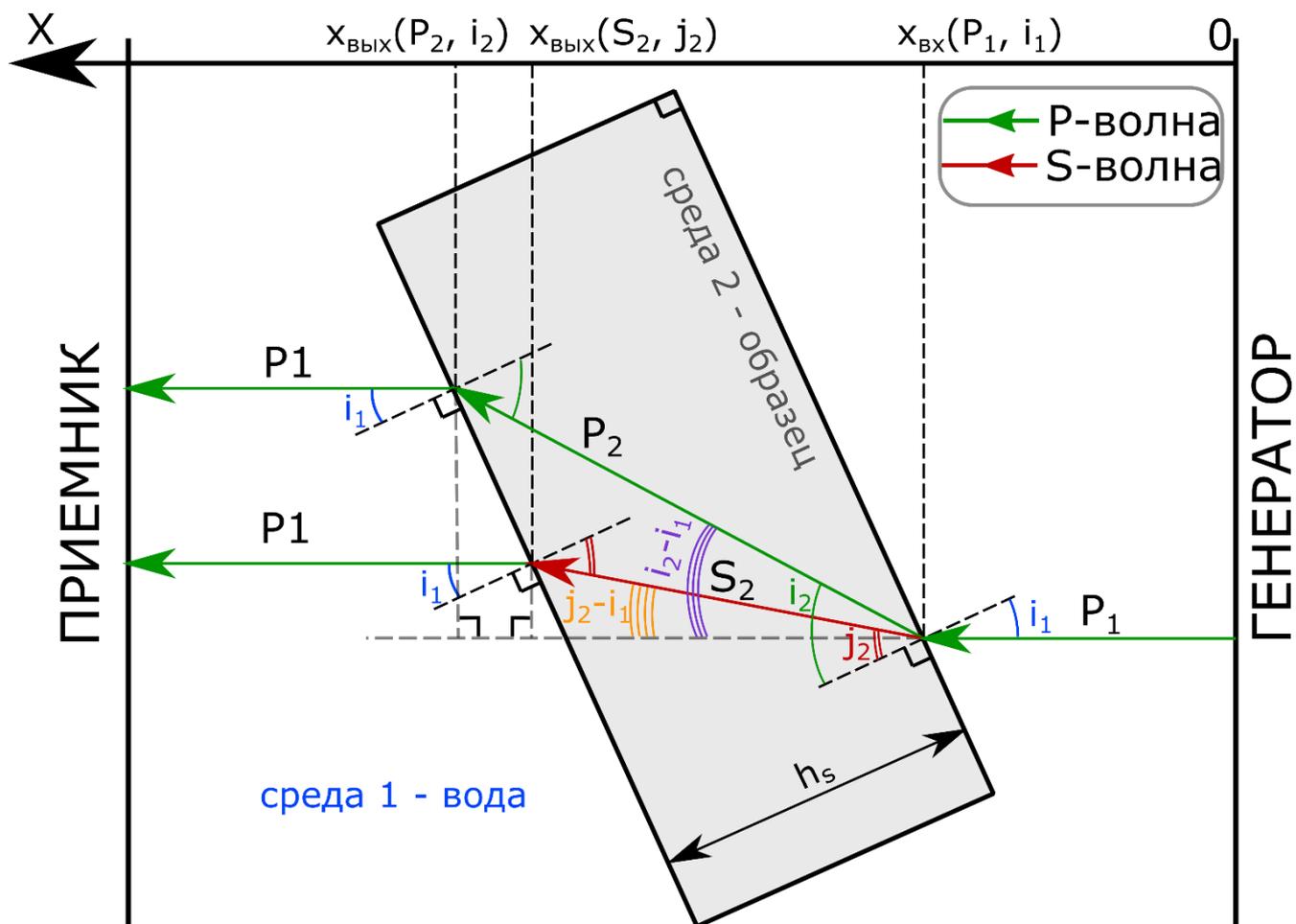


Рисунок 3.6 – Схема распространения волн в образце и кювете с водой установки Геоскан-02МУ

Рассмотрим геометрическое представление прохождения продольной волны от генератора до приемника с установленным образцом в кювету с водой на схеме, на которой нижние индексы указанных параметров соответствуют номеру среды (среда 1 – вода, среда 2 - образец).

По данной схеме легко видеть, что любая из типов волн в образце проходит следующий путь:

$$x_{\text{ВЫХ}}(P_2, i_2) - x_{\text{ВХ}}(P_1, i_1) = c_{P_2} \cdot T_2 \cdot \cos(i_1 - i_2) \quad (3.7)$$

или

$$c_{P_2} \cdot T_2 \cdot \cos(i_2) = h_s \quad (3.8)$$

где  $i_1$  – угол падения продольной волны  $P_1$  на границе «вода-образец»  $x_{\text{ВХ}}(P_1, i_1)$  (чтение схемы справа налево),  $i_2$  – угол, под которым распространяется волна  $P_2$  в среде образца до границы  $x_{\text{ВЫХ}}(P_2, i_2)$ ,  $c_{P_2}$  – скорость волны  $P_2$  в образце,  $h_s$  – толщина образца,  $T_2$  – время распространения волны  $P_2$  в образце.

По закону Снелла:

$$\frac{\sin(i_2)}{c_{P_2}} = \frac{\sin(i_1)}{C_w} \quad (3.9)$$

где  $C_w$  – скорость распространения продольной волны  $P_1$  в воде.

Данные выражения справедливы для любого из типов волн.

Проведя простые математические операции, можно выразить время прохождения волн как «P [P] P», так и «P [S] P» в виде универсальной формулы:

$$T(i_1) = T_w + h_s \cdot c_w^{-1} ([c_w^2 \cdot c^{-2} - \sin^2(i_1)]^{1/2} - \cos(i_1)) \quad (3.10)$$

где  $c$  – скорость акустического импульса волны ( $P$  или  $S$ ) в образце толщиной  $h_s$ ,  $T_w$  – время распространения акустического импульса в иммерсионной жидкости без образца.

Скорости акустических волн в образце находились методом наименьших квадратов на основе экспериментально определенных времен пробега  $T(i_1)$  с использованием (3.10) и метода минимизации ошибок Нелдера-Мида.

В экспериментах не учитывались углы, превышающие угол полного внутреннего отражения волны, и углы, при которых амплитуда акустического

импульса составляла менее 10 % от максимальной наблюдаемой амплитуды акустической волны исследуемого типа.

Экспериментальные данные (точки, обозначенные как крестики на карте волновой формы) аппроксимировались теоретической кривой уравнения 3.10, данная кривая выделена зеленым цветом.

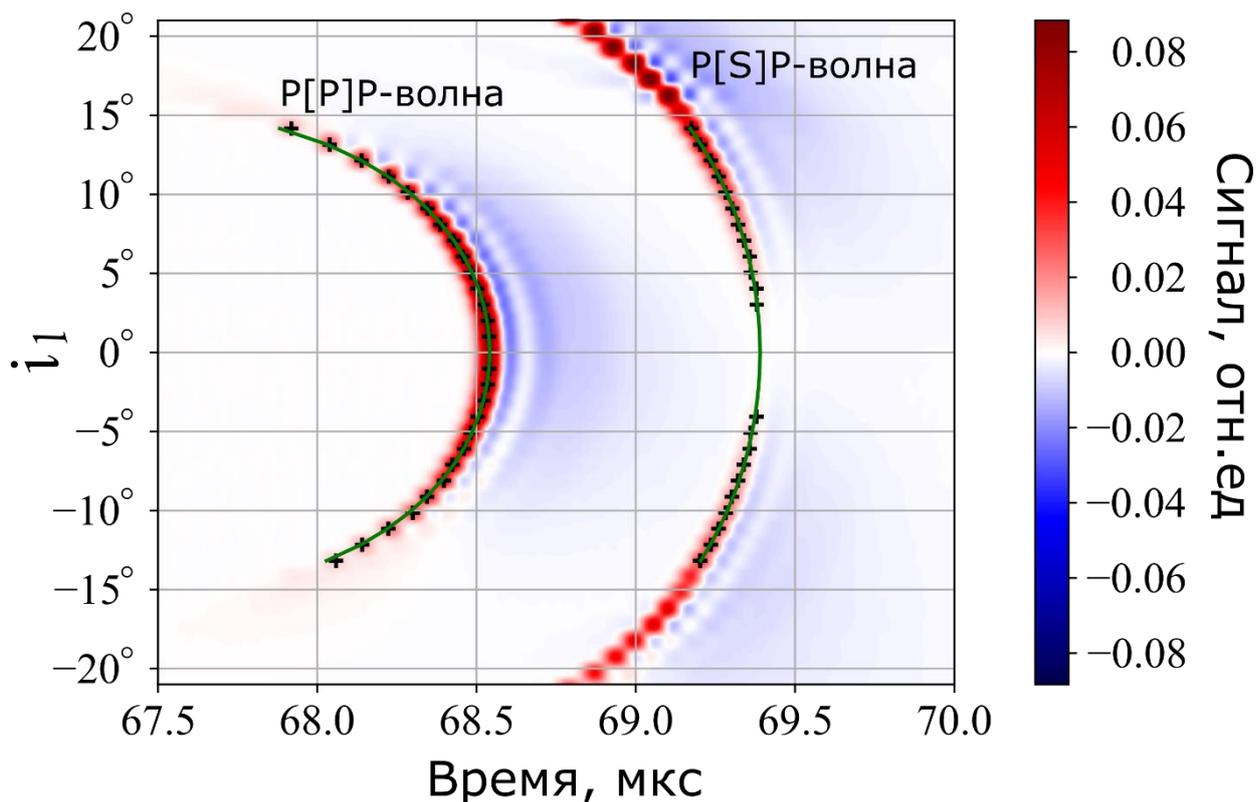


Рисунок 3.7 – Построенная временная карта регистрации амплитуд импульсов «Р» и «S» - волн приемником установки Геоскан-02МУ в зависимости от угла поворота образца (КвС 110)  $i_1$ , находящегося в кювете с водой. Маркеры «+» расположены в максимумах осциллограмм. Темно-зелеными линиями показана зависимость (3.10).

3.3 Дополнительная верификация значений скоростей распространения волн в модельных образцах различными методами лазерной ультразвуковой диагностики

Результаты, полученные с помощью установки Геоскан-02МУ, представлены в графическом виде на рисунке 3.8 и в виде таблицы 3.5, представленных ниже.

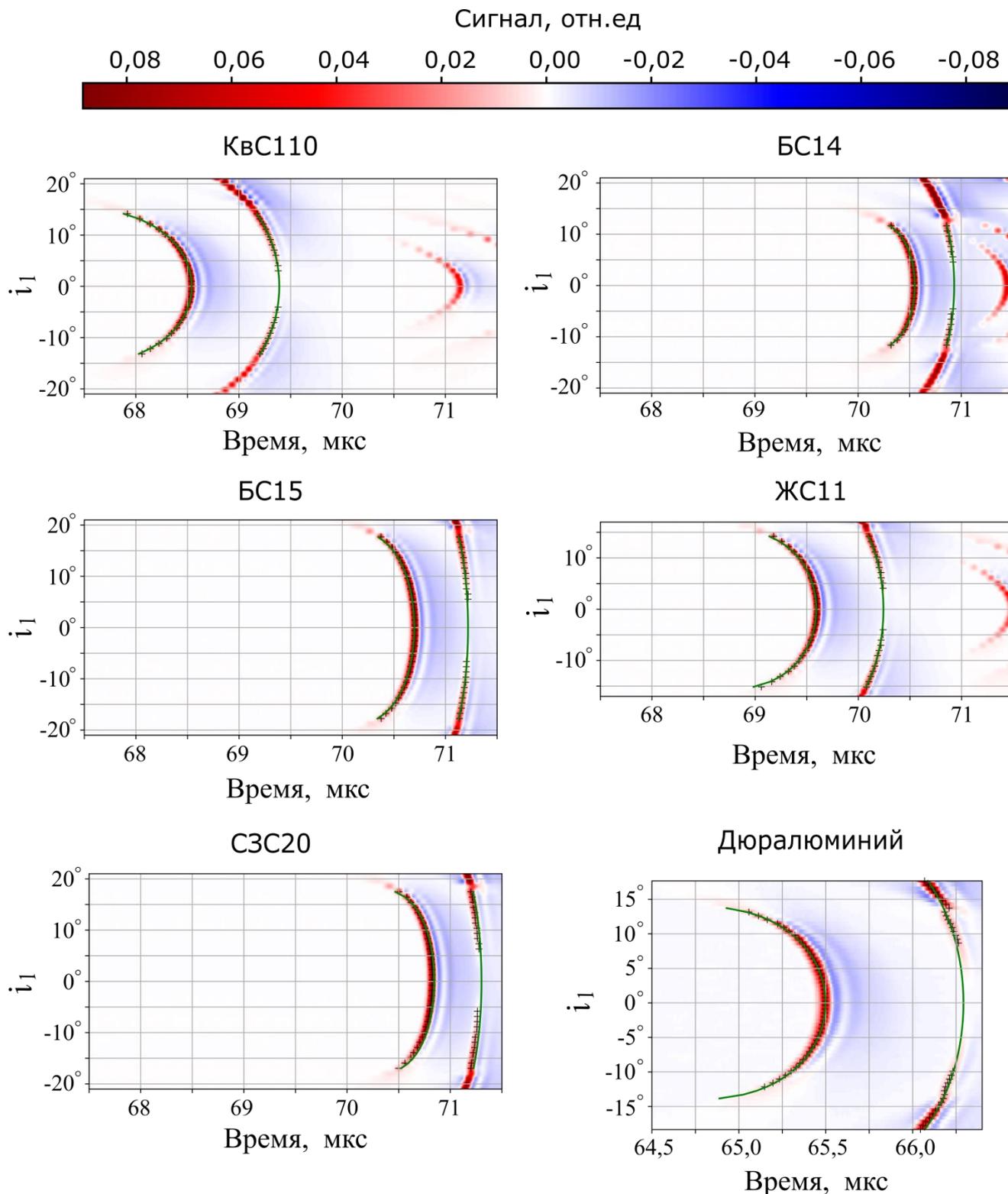


Рисунок 3.8 – Построенные временные карты регистрации амплитуд импульсов «Р» и «S» - волн приемником установки Геоскан-02МУ в зависимости от угла поворота различных модельных образцов.

Таблица 3.5. Значения скоростей упругих волн, определенных с помощью разных режимов работы ЛУД, в модельных образцах.

Образец	Толщина $h_s$ , мм	Эхо-методы			Теневой метод	
		Вид метода	$C_l$ , м/с	$C_t$ , м/с	$C_l$ , м/с	$C_t$ , м/с
Стекло КВС110 (прозрачное)	7,315±0,059	Эхо	5606±2	3279±1	5612±45	3408±27
		Оптимизированный эхо	5631±1	3359±2		
Стекло БС14 (прозрачное)	3,057±0,020	Эхо	6795±5	3229±15	6849±44	3574±24
		Оптимизированный эхо	6870±12	3473±20		
Стекло БС15 (прозрачное)	3,219±0,015	Эхо	4547±3	2371±9	4528±21	2626±12
		Оптимизированный эхо	4580±6	2508±10		
Стекло ЖС11 (желтоватое)	5,217±0,017	Эхо	5523±3	3098±6	5485±17	3270±11
		Оптимизированный эхо	5550±3	3207±7		
Стекло СЗС20 (синее)	2,820±0,041	Эхо	4816±6	2427±10	4954±72	2772±40
		Оптимизированный эхо	4857±7	2656±16		
Дюралюминий	4,991±0,010	Эхо	6523±18	3012±19	6376±12	3127±6
		Оптимизированный эхо	6472±11	3073±8		

Таблица 3.5 показывает, что разница в значениях скорости *продольных* волн, определенных с использованием эхо-методов (эхо-метода или оптимизационного эхо-метода) и теневого метода, в модельных образцах в среднем была в пределах 1,2%, за исключением образца СЗС 20, который обладал самой наименьшей толщиной из всех модельных образцов и наибольшим коэффициентом вариации толщины, равным 1,45 % (разница скорости волны составила 2,8 %).

Разница значений скорости *сдвиговой* волны, определенная теневым методом и *оптимизационным эхо-методом*, была наилучшей для образца высшей степени однородности КВС 110 – и составила всего 1,43 %. Примечательно, что с помощью разработанного оптимизационного эхо-метода определение значений скоростей сдвиговых волн было наилучшим по сравнению с другими методами ЛУД.

Важно отметить, оптимизационный метод определения скоростей *сдвиговых* волн показал лучшие сравнительные результаты по сравнению с теневым методом (разница составила до 2,8 %), в отличие от «классического» эхо-метода (разница составила до 4,8%).

Данный факт обосновывает дальнейшее использование разработанного оптимизационного метода и его апробацию на гетерогенных средах, особенно для определения скоростей сдвиговых волн.

Расхождения в экспериментальных и расчетных временных формах сигналов, полученных с помощью эхо-методов, можно объяснить несколькими факторами.

Во-первых, лазерный луч из многомодового оптического волокна не совсем гауссовский. Подход с множеством гауссовых пучков [123] может использоваться для повышения точности.

Во-вторых, поверхность ОА генератора не была отполирована, поэтому между ОА генератором и образцом мог быть тонкий слой связующего вещества (воды), который существенно влиял на форму волны «РР».

Наконец, члены высшего порядка в ряду Тейлора для коэффициента отражения  $W_m(p)$  волны «Р [PS] Р + Р [SP] Р» и передаточной функции  $\mathcal{K}_m(\omega, k_{\perp})$ , а также генерации поверхностных акустических волн могут также повлиять на форму импульса «Р [PS] Р + Р [SP] Р».

Ниже в таблице 3.6 представлены ДМУ модельных образцов, полученные с помощью разных режимов работы и методов ЛУД.

Таблица 3.6. Рассчитанные упругие характеристики модельных образцов.

Образец	Эхо-метод			Оптимизированный эхо-метод			Теневой метод		
	$E_{dyn}$ , ГПа	$G$ , ГПа	$\mu$	$E_{dyn}$ , ГПа	$G$ , ГПа	$\mu$	$E_{dyn}$ , ГПа	$G$ , ГПа	$\mu$
Стекло КвС110 (прозрачное)	60,3±1,7	24,3±0,9	0,24	62,4±1,8	25,5±1,0	0,22	63,4±2,5	26,2±1,2	0,21
Стекло БС14 (прозрачное)	86,7±1,9	32,0±1,1	0,35	98,4±2,2	37,0±1,2	0,33	103,0±4,1	42,7±1,1	0,29
Стекло БС15 (прозрачное)	34,3±0,5	13,1±0,3	0,31	37,6±0,9	14,6±0,4	0,29	40,0±2,3	16,0±0,5	0,25
Стекло ЖС11 (желтоватое)	64,0±1,3	25,2±0,8	0,27	67,4±1,7	27,0±0,7	0,25	68,7±1,5	28,0±0,6	0,22

Стекло СЗС20 (синее)	35,3±0,6	13,3±0,4	0,33	41,0±1,3	15,2±0,5	0,30	44,1±1,6	17,3±0,7	0,27
Дюралюминий	68,6±0,9	26,2±1,0	0,35	70,9±1,3	26,2±1,2	0,35	72,1±1,6	27,1±1,3	0,33

Анализируя полученные значения ДМУ модельных образцов, можно сделать вывод, что наилучшая сходимость результатов была между методами оптимизационным эхо и теневым методом ЛУД.

Например, лучшие результаты ДМУ были достигнуты на модельных образцах КвС 110, ЖС11 и дюралюминия – для них разница составила около 2,6 %, это обуславливается высокой степенью однородности и высокой степени плоскопараллельности граней образцов. Для образцов БС15 и СЗС 20 разница ДМУ составила до 7,7%, это обусловлено высокой разницей скоростей сдвиговых волн, определенных разными методами для данных модельных образцов.

Разница ДМУ модельных образцов, полученных с помощью оптимизационного эхо-метода и теневого метода колебалась в интервале от 1,6% до 7,7%. Разница ДМУ сдвигового модуля составила до 15,4%, высокие значения расхождения сдвигового модуля связано с сильной зависимостью модуля от значения скорости сдвиговой волны в образце.

На основе полученных результатов и их анализа, можно сделать следующие выводы, которые будут необходимы для дальнейшей апробации на образцах неоднородных сред (горных пород и минералов):

1. Динамический модуль упругости – это расчётная физическая величина, зависящая от значений скоростей упругих волн, последние зависят от двух косвенных характеристик: точности измерения толщины исследуемого образца и регистрации времени «пробега» волны;

2. Сила прижима генератора (преобразователя) при эхо-режиме принципиально важна для получения качественного сигнала;

3. Параллельность генератора и приемника, температура воды в иммерсионной ванне теневого режима играют значительную роль в определении ошибки значений скоростей волн.

### 3.4 Пример определения динамических модулей упругости на образце-пластине известняка с помощью оптимизационного эхо-метода

Разработанный оптимизационный алгоритм нахождения скоростей продольных и сдвиговых волн был протестирован на сухом образце известняка толщиной 3,91 мм. При этом важно было учесть затухание ультразвука с коэффициентом затухания, пропорциональным квадрату частоты. Результаты измерений и расчёта аналитической зависимости представлены на рисунке 3.11. При этом определённые значения скоростей продольных и сдвиговых волн составили:  $c_l = 4251 \pm 35$  м/с и  $c_t = 2369 \pm 19$  м/с.

Таким образом, использование оптико-акустического генератора и широкополосного ПЭП в режиме эхо-импульсов позволяет одновременно с высокой точностью регистрировать скорости продольных и сдвиговых волн и в дальнейшем рассчитывать по ним локальные значения ДМУ и сдвига.

ДМУ данного образца-пластины, определенный с помощью оптимизированного эхо-метода равен  $37,8 \pm 0,4$  ГПа. Экспериментально определенное значение ДМУ с помощью эхо-метода составило  $39,3 \pm 0,5$  ГПа.

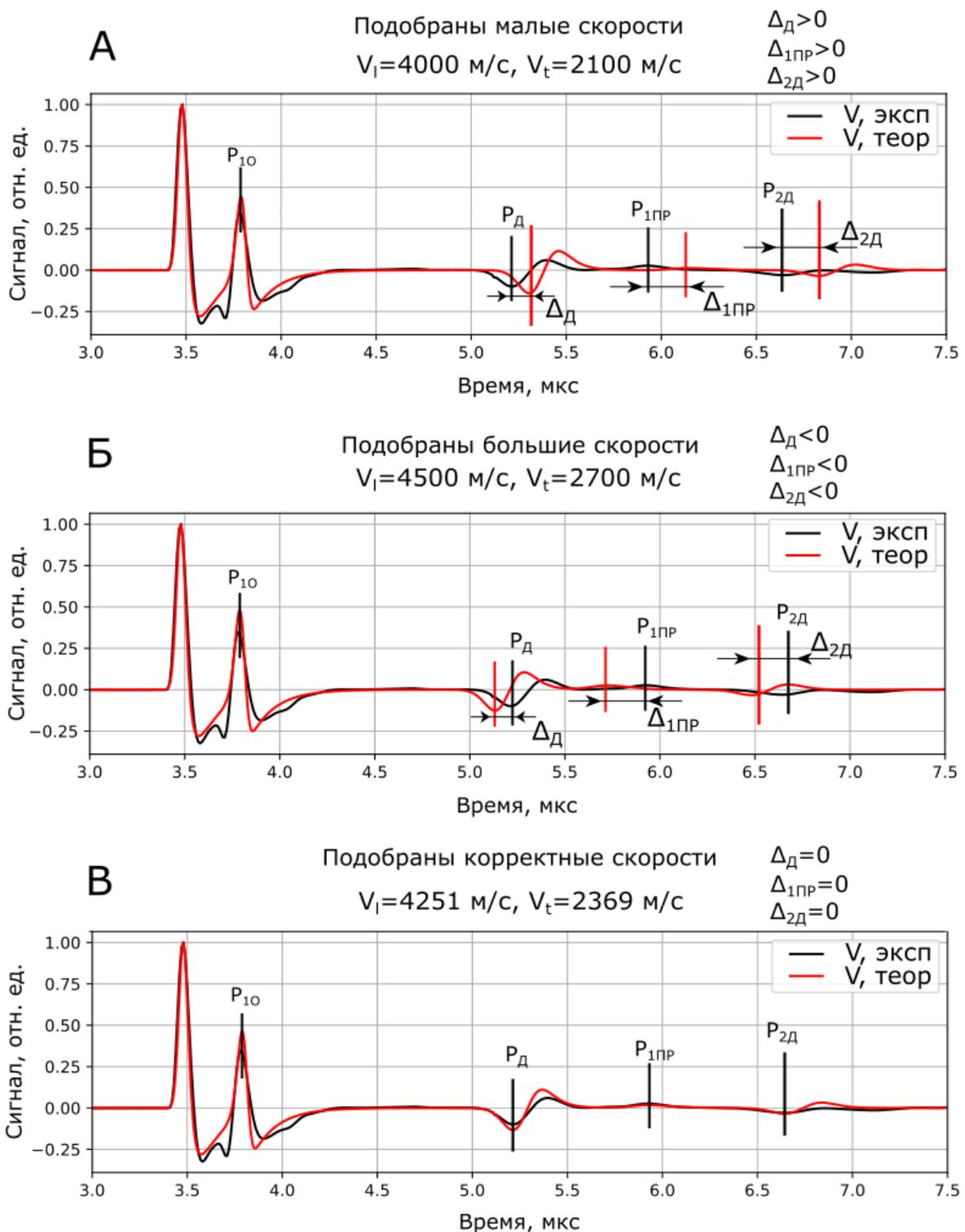


Рисунок 3.9 – Расчётная и экспериментальная временные формы сигналов, полученные на образце известняка. А – подобраны малые значения скоростей волн и временная форма сигнала, построенная с помощью оптимизационного алгоритма смещена вправо, Б – подобраны большие значения скоростей волн и временная форма сигнала, построенная с помощью оптимизационного алгоритма смещена влево, В – подобраны корректные значения скоростей волн и формы импульсов идеальны совпали.

### 3.5 Выводы

Основными результатами третьего раздела можно выделить следующее:

- Проведена апробация разработанного оптимизационного метода определения скоростей упругих волн на модельных образцах, проведено сравнение с другими методами ЛУД;
- Модернизирована и автоматизирована экспериментальная установка теневого иммерсионного режима работ ЛУД Геоскан-02МУ (получен патент);
- Разработан алгоритм определения скоростей упругих волн с помощью теневого метода;
- Проведена дополнительная верификация значений скоростей распространения упругих волн в модельных образцах с помощью теневого метода и сравнение ДМУ, полученных с помощью разных методов ЛУД;
- Установлено, что оптимизационный метод позволяет определять ДМУ образцов изотропных сред с точностью до 2,6% (по сравнению с теневым методом);
- Сравнение эхо-метода и оптимизационного метода показало, что существенный вклад в погрешность определения скоростей волн вносит сила прижима ПЭП и наличие или отсутствие контактной жидкости на поверхности исследуемого образца. Разница определения скоростей продольных волн оптимизационным методом и эхо-методом составила до 1,9%, сдвиговых волн до 4,8 %;
- Разработаны общие методические подходы к определению ДМУ, которые в дальнейшем положены в основу *«Методики определения динамических модулей упругости разномасштабных образцов горных пород с использованием комплексного метода лазерной ультразвуковой диагностики»*, приведенной в Приложении Е.

## ГЛАВА 4. УСТАНОВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛАЗЕРНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД РАЗЛИЧНЫХ ГЕНОТИПОВ

### 4.1 Подготовка образцов горных пород

С целью применения разработанного алгоритма определения скоростей и дальнейшего расчёта динамических модулей упругости были проведены лабораторные испытания образцов горных пород.

В соответствии с требованиями [127] упругие постоянные могут быть рассчитаны для изотропных или слегка анизотропных пород. Изотропия образца оценивается по изменению скорости упругой волны в трех взаимно-перпендикулярных плоскостях образца.

Для дальнейших экспериментальных исследований были выбраны образцы трех генотипов: магматической, осадочной и метаморфической.

Исследуемые образцы гранита были отобраны с различных месторождений гранитов (Мансуровское, Возрождение и Юрьевское), образцы известняка и мрамора были получены при геологической разведке месторождения Бранко Валонго (Португалия), образцы долеритов (диабазы) и аргиллитов с Павловского месторождения свинцово-цинковых руд Крайнего севера (остров Южный, архипелаг Новая Земля), пироксениты и шунгиты отбирались на Загожинском месторождении (Карелия) [128]. Все образцы, исследуемые в дальнейшем, были изготовлены из кернов вышеперечисленных пород. Важно отметить, что для показательных экспериментов отбирались керны с высокими показателями TCR, SCR и RQD. В таблице 4.1 представлены краткие описания образцов.

Таблица 4.1 Описания образцов для дальнейших исследований.

№	Наименование горной породы	Генотип	Месторождение	Скважина/тип получения/добычи
1	Пироксениты	Магматический	Кольское «Рудник «Железный»	Нет данных
2	Долериты	Магматический	Павловское	Бурение, КЦ-4Т/009 (72,7 м)
3	Известняки	Осадочный	Бранко	Нет данных
4	Аргиллиты	Осадочный	Павловское	Нет данных
5	Мраморы	Метаморфический	Бранко	Бурение, КЦ-7Т/006 (22,0 м)
6	Шунгиты	Метаморфический	Загожинское	Нет данных
7	Гранит (светло-серый)	Магматический	Возрождение	Открытая
8	Гранит (серый)	Магматический	Мансуровское	Открытая
9	Гранит (красный)	Магматический	Юрьевское	Открытая

Способ добычи образцов – бурение скважин, выемка керна при геологоразведке.

Планирование исследования состояло из комплекса мероприятий, направленных на эффективную постановку экспериментов с использованием теневого режима работы лазерной ультразвуковой диагностики на установке Геоскан-02МУ и эхо-режима с использованием установки УДЛ-2М.

Предварительный алгоритм проведения экспериментов был следующий:

1. Из отобранного керна с высокими показателями его извлечения выбирались образцы – представители определенного генотипа без видимых структурных нарушений;

2. Далее подготавливались полноразмерные образцы (в соответствии [62, 127]) с помощью отрезного станка и шлифовально-полировальной машины (использовались машины фирмы Struers, отличительной характеристикой которых является их прецизионность);

3. Каждый подготовленный полноразмерный образец (прямоугольно-параллелепипедной формы с размерами порядка 40x40x80 мм) исследовался с помощью Геоскан-02МУ в теневом режиме по алгоритму, представленному в подразделе 3.4.3;

4. Далее каждый полноразмерный образец распиливался на  $L$  образцов-пластин разной толщины;

5. Каждый соответствующий полноразмерному образцу образец-пластина исследовался с помощью УДЛ-2М в эхо-режиме по алгоритму, представленном в подразделе 3.6;

6. В конечном итоге локальные значения скоростей, полученные в не менее, чем  $K$  точек по площади сканирования образца-пластины, усреднялись и данное значение сравнивалось со значением скорости, полученном в полноразмерном образце. Число  $K$  задавалось, исходя из структурных особенностей образцов геоматериалов и варьировалось в пределах 5-30.

Графическое представление хода экспериментов представлено ниже на рисунке 4.1

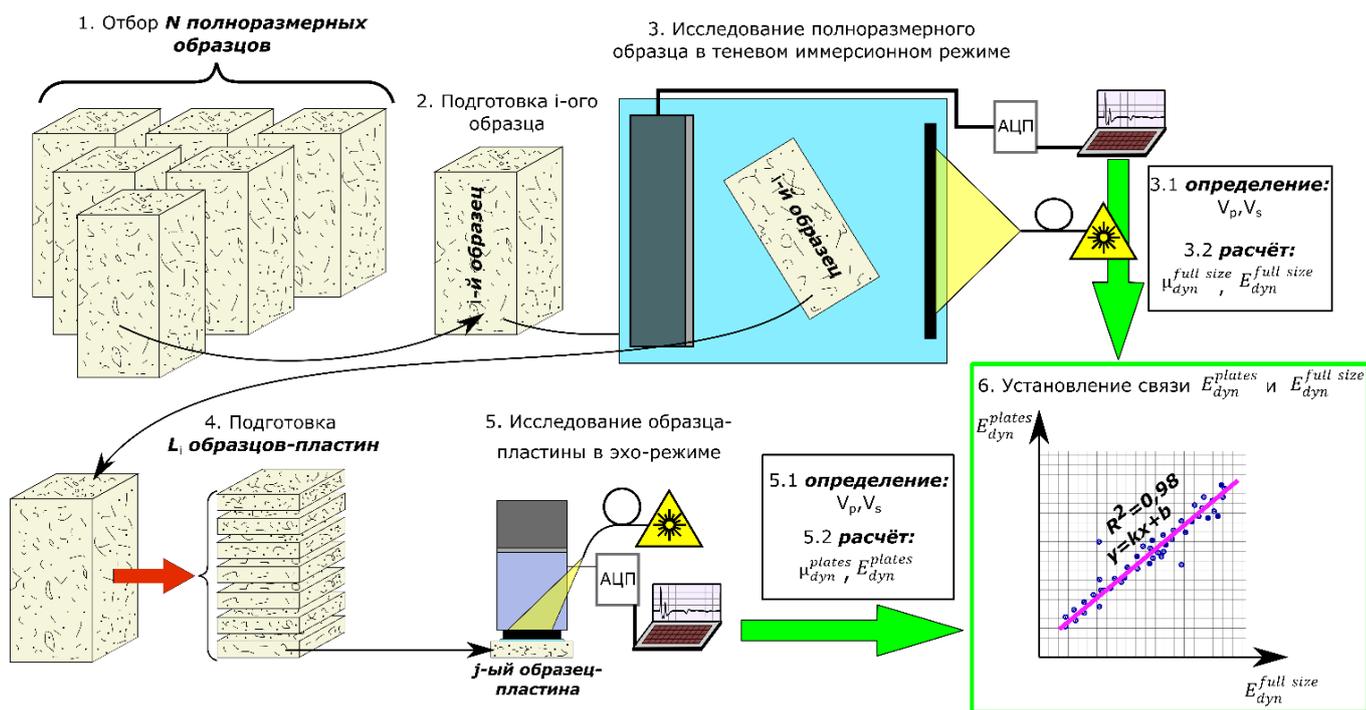


Рисунок 4.1 – Общий алгоритм исследования от полноразмерных образцов до образцов-пластин

## 4.2 Подготовка аншлифов для оценки минерального состава образцов и их структуры

Исследования аншлифов, подготовленных из соответствующей литологической разницы образцов горных пород, проводились с помощью как оптического режима работы растрового электронного микроскопа Phenom ProX (РЭМ), так и энергодисперсионного спектрального анализа (ЭДС).

К сожалению, микроскопия обеспечивает анализ поверхностной структуры только в некотором сечении образца и не дает возможности осуществлять визуализацию структуры в объеме образца [114].

На рисунке 4.2 представлены макрофотографии горных пород, использованных в данном исследовании. Также ниже приводится краткое петрологическое описание.

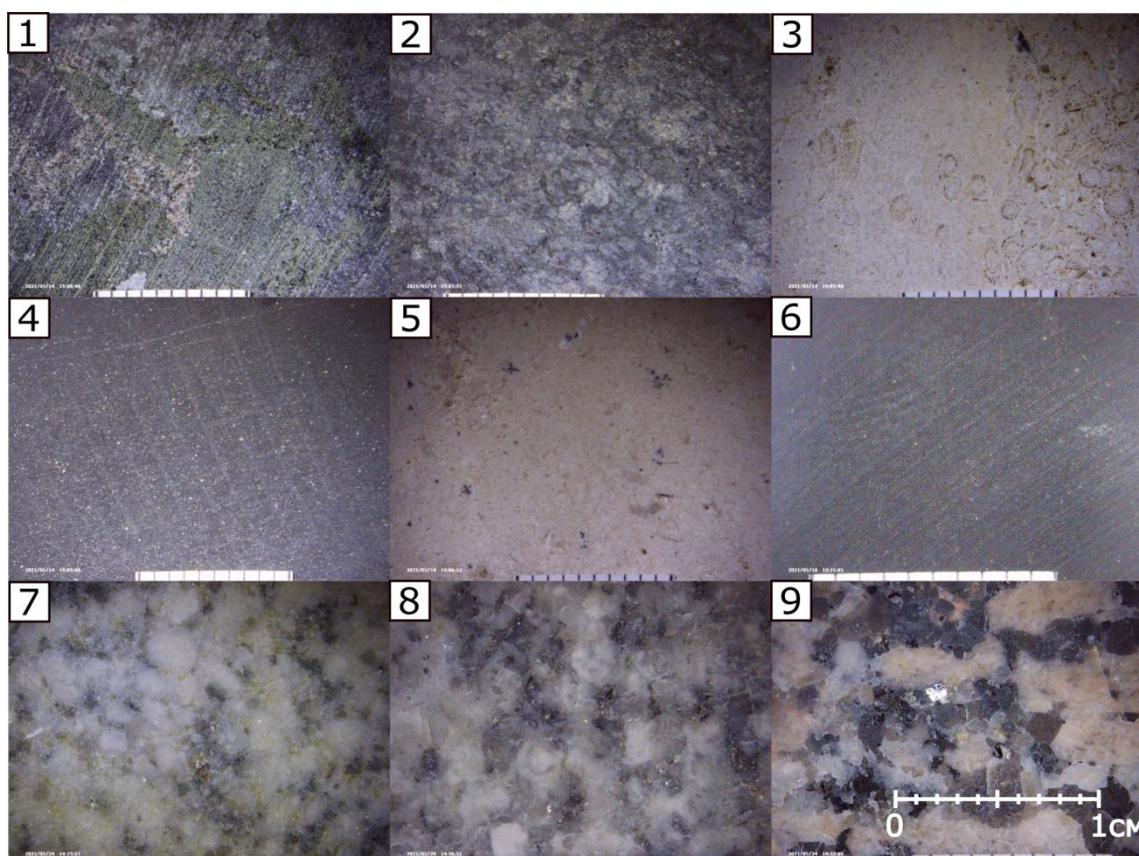


Рисунок 4.2 – Породы, использованные в исследовании: пироксенит (Prx), долерит (диабаз, Dlr), известняк (Lms), аргиллит черный (Arg), мрамор (Mrb), шунгит (Shg), гранит (GrV), гранит (GrM), гранит (GrU)

#### 4.2.1 Оценка структурных особенностей с помощью РЭМ Phenom ProX

Для более детальной оценки текстурно-структурных особенностей был проведен микроскопический анализ подготовленных аншлифов всех соответствующих образцов горных пород, которые далее исследовались с помощью ЛУД. Также был произведен элементный анализ данных аншлифов с целью установления однородности не только структурно, но и по составу, относительно массовой доли тех или иных элементов. Микроскопический и элементный анализы проводились с помощью растрового электронного микроскопа(РЭМ) Phenom ProX (далее РЭМ) [129].

С помощью РЭМ были выявлены особенности микроструктуры минералов, анато-петрографические особенности их вещества, состав минеральной матрицы, выполнена диагностика минеральных компонентов.

Ниже на рисунке 4.3 представлены графические материалы (фотографии, микрофотографии).

Важно отметить, что определение элементного состава (Element Identification) по аншлифу проводилось как в точке, так и по некоторой площади (Elemental Mapping and Line Scan).

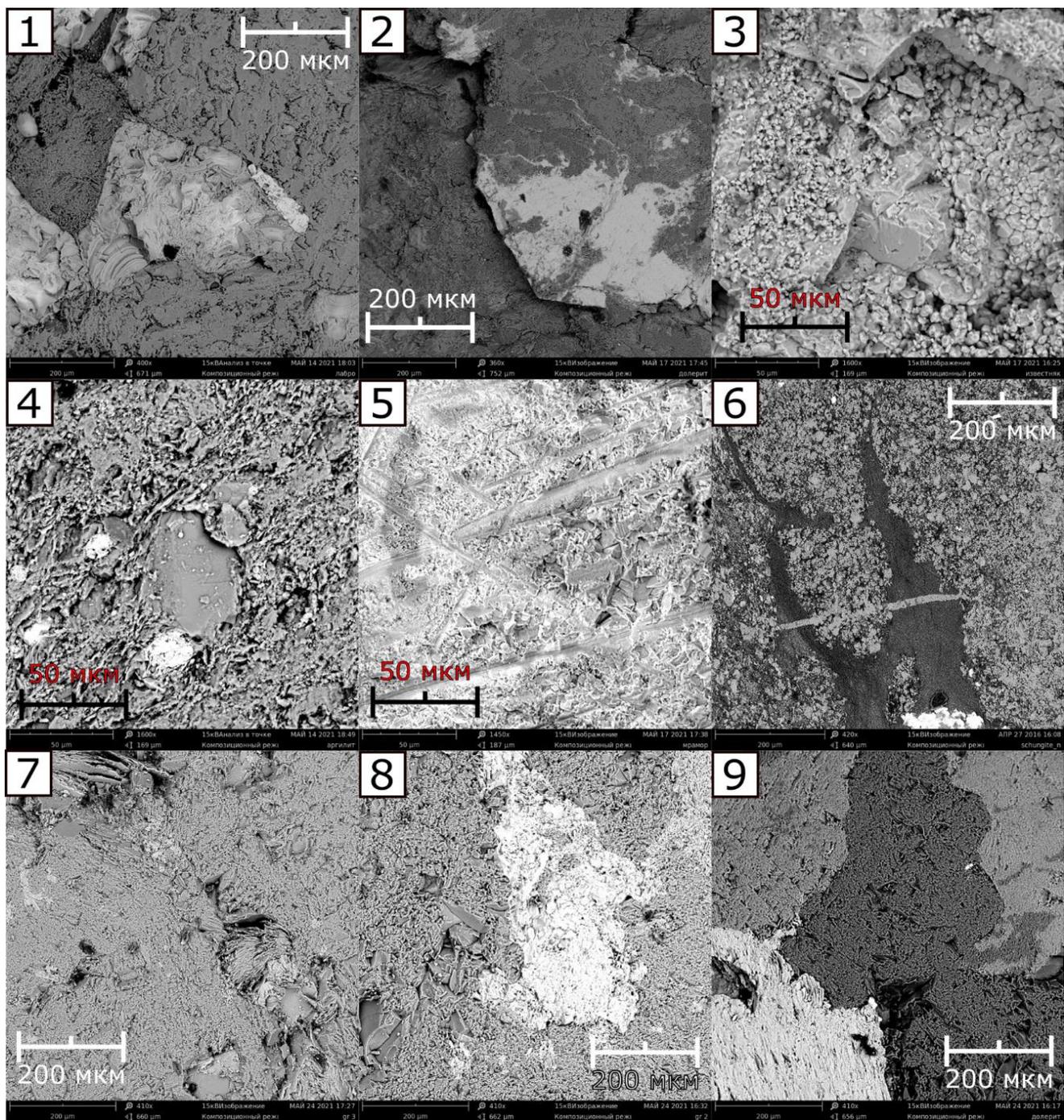


Рисунок 4.3 – Снимки поверхностной структуры шлифов исследуемых образцов (пироксенит, долерит, известняк, аргиллит, мрамор, шунгит, гранит Возрождение, гранит Мансуровский, гранит Юрьевский)

На основе макроскопического и микроскопического анализа шлифов исследуемых образцов горных пород можно сделать вывод, что единой общностью результатов исследования текстурно-структурных особенностей исследуемых в дальнейшем каждого из образцов горных пород является их «относительная однородность». Данный термин подразумевает, что каждый из

представителей отдельной генетической группы горных пород обладал равномерным распределением зерен, сплошностью цементирующего вещества.

Данные особенности позволяют сделать вывод о слабой анизотропии в используемых в дальнейшем образцов.

Изготовлению образцов уделялось большое внимание, поскольку погрешность в измерении толщины образца давала основной вклад в погрешность определения скоростей для каждого соответствующего образца (погрешность учета времени не учитывалась ввиду высокой точности ее определения). Определение значений скоростей волн в образце проводилось в соответствии с общим алгоритмом работы на установке Геоскан-02МУ, представленном в подразделе 3.4.3.

Таблица 4.2 Сводная таблица подготовленных полноразмерных образцов с размерами, округленными до 1 мм.

№	Горная порода	Генотип	Текстура	Структура	Основные минералы	Размеры, мм
1	Prx	Магм	Массивная	Полнокристаллическая	Пироксен, оливин, апатит, слюды до 100 мкм	30x30x60
2	Dbx	Магм	Массивная	Полнокристаллическая	Основная часть - плагиоклаз. Пироксен, магнетит, апатит, кварц	35x35x70
3	Lms	Осад	Пористая, 150 мкм	Органогенная	Кристаллы кальцита разноразмерные, карбонат кальция	50x50x50
4	Arg	Осад	Массивная	Пелитовая	Единичные включения биотита, мусковита (мелкого размера)	40x40x70
5	Mrb	Метаморф	Массивная, невысокая пористость	Кристаллобластовая	Кристаллы кальцита разноразмерные, карбонат кальция	40x40x70
6	Shg	Метаморф	Массивная	Пелитовая		40x40x60
7	GrV	Магм	Однородная	Неравномерная нозернитая	Плагиоклаз, кварц, КППШ	30x30x60
8	GrM	Магм	Однородная	Неравномерная нозернитая	Мусковит, биотит, кварц, КППШ	30x30x60
9	GrU	Магм	Однородная	Мелкозернистая	Кварц, КППШ, плагиоклаз, биотит	30x30x60

Текстурно-структурные особенности, перечисленные в таблице 4.3 были определены в соответствии с [130].

Точные значения размеров образцов с учетом погрешности в их определении приведены в сводной информации об образцах в *Приложении Б*.

#### 4.3 Исследование полноразмерных образцов горных пород с помощью теневого режима работы лазерной ультразвуковой диагностики

##### 4.3.1 Измерение скорости упругой продольной волны в воде в кювете установки Геоскан-02МУ

Расчёт скорости звука в воде проводился с помощью метода наименьших квадратов в соответствии с алгоритмом, представленном в подразделе 3.4.3. Значение на момент проведения экспериментов составило  $1491 \pm 6$  м/с. В дальнейшем данное значение было использовано для расчёта значения скоростей волн различных типов в образце по формуле 3.10.

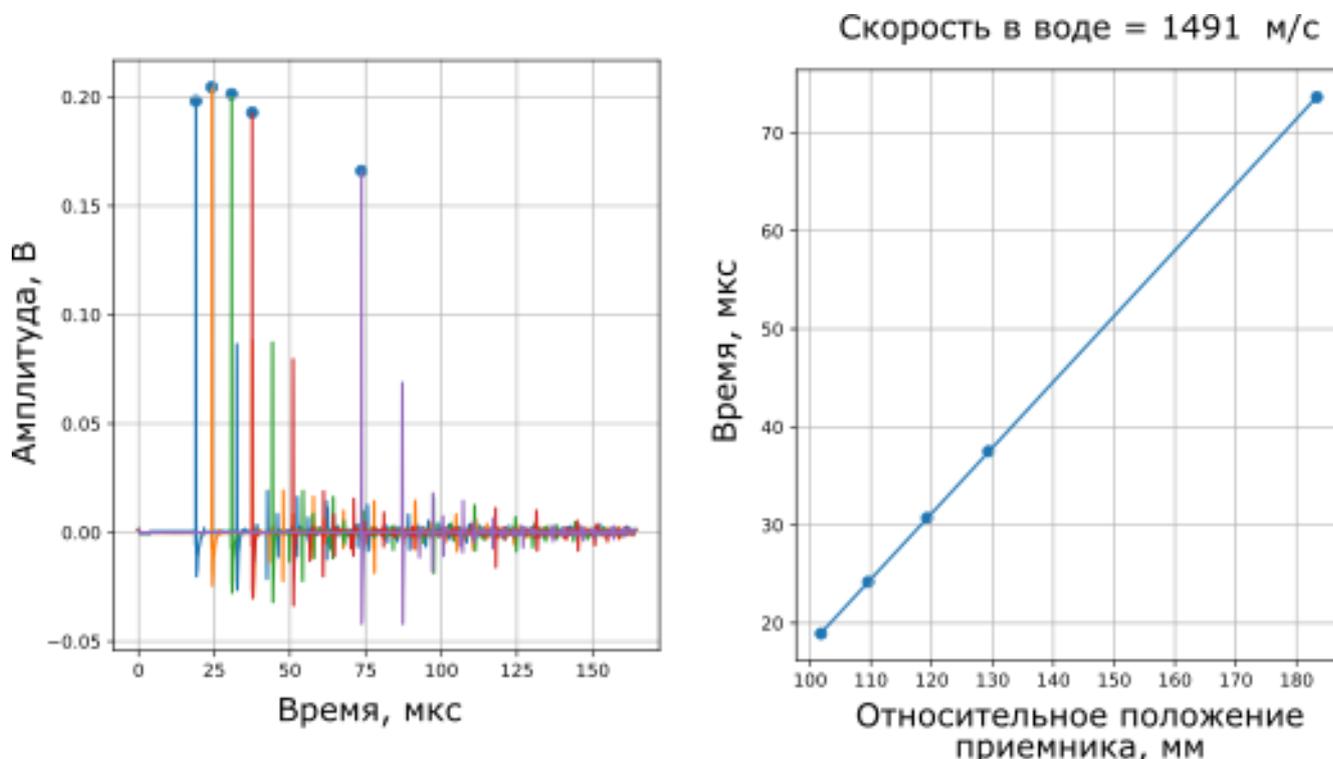


Рисунок 4.4 – Формы измеренных сигналов продольной упругой волны в кювете с водой при 5 различных положениях приемника относительно генератора и график зависимости времени от относительного положения приемника

### 4.3.2 Проверка образцов горных пород на акустическую изотропность

Принципиальным пунктом исследования было изучение каждого отдельного полноразмерного образца на «акустическую изотропность» продольной волны (данная процедура проводится в соответствии с ISRM рекомендациями и ASTM D653). Разница скоростей продольных акустических волн в 3 плоскостях образца (в соответствии с рисунком 4.5, А) не должна превышать 2,0 % от их среднего значения.

Для каждого исследуемого полноразмерного образца в 3 его плоскостях были определены скорости продольной волны, разброс которых от среднего не превышал 1,9%, данное значение ошибки хорошо согласуется с пунктом 8.4 ASTM D2845-08 [127]. Таким образом было подтверждено «ненарушенное» состояние образцов, без существенно влияющих на значение скорости структурных особенностей (трещин, пор).

Значения скоростей продольных и сдвиговых волн, определенных с помощью теневого режима образцов (перпендикулярно XZ плоскости, рисунок 4.5) приведены в *Приложении Б*. Важно отметить, что были получены групповые скорости для каждого из образцов.

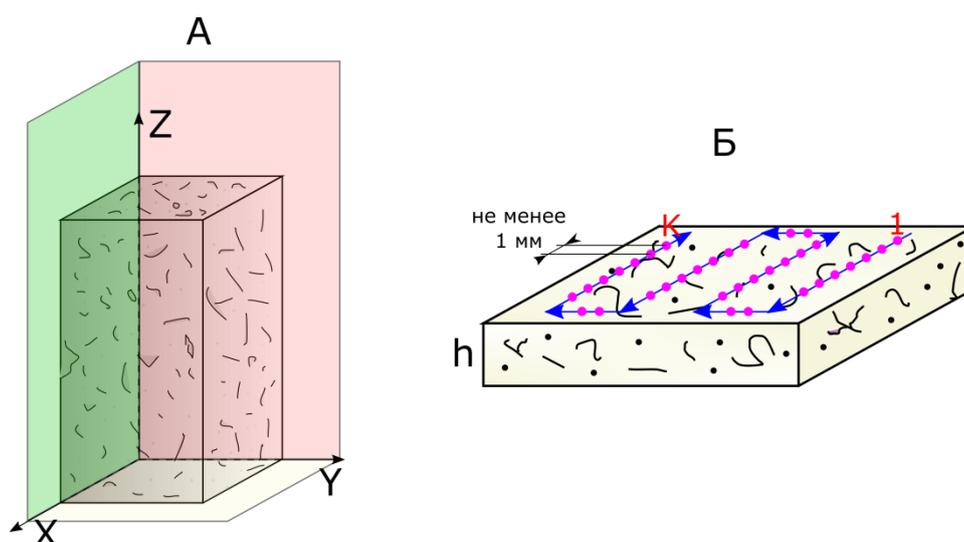


Рисунок 4.5 – Схема (а) плоскостей полноразмерного образца, перпендикулярно которым проводилось измерение скорости продольной волны и схема (б) исследования образца-пластины с 1 по K – ую точку по поверхности

4.4 Исследование образцов-пластин горных пород, подготовленных из полноразмерных образцов, с помощью эхо-методов лазерной ультразвуковой диагностики по групповым скоростям

4.4.1 Определение минимальной допустимой толщины образца-пластины для определения динамического модуля упругости

Для акустического исследования образцов горных пород важным требованием является определение минимальной толщины образца для «прозвучивания».

ISRM рекомендует, чтобы минимальный поперечный размер был не менее чем в 10 раз больше длины волны, в то время как ASTM [127] предусматривает 5-кратную длину волны.

Другим важным фактором, влияющим на скорость ультразвука, является размер зерен исследуемой породы. Так, в [131, 132] есть рекомендации, чтобы длина акустического пути через породу было как минимум в 10 раз больше среднего размера зерна.

Важно отметить, что даже в однородных изотропных образцах разной толщины групповая скорость упругих волн различных типов несколько различаются. Это обусловлено влиянием дисперсии, связанной с дифракцией и затуханием.

В соответствии с требованиями различных стандартов минимальный допустимый размер образца, исследуемый с помощью ультразвука определяется в зависимости от размера зерен (график, показывающий допустимые значения диаметра образца, длины образца и среднего размера зерна в зависимости от отношения скорости распространения волны раздел 1, рисунок 1.1), слагающих данный образец и центральную частоту ультразвуковых пьезопреобразователей. Диапазон частот, рекомендуемый ASTM [127] от 75 кГц до 3 МГц, ISRM рекомендует использовать частоты от 54 кГц до 3 МГц. Но ввиду того, что ЛУД

реализована в нескольких режимах работы с полосой частот от 20 кГц до 20 МГц, появляется возможность определения и анализа фазовых скоростей волн в различных частотных диапазонах.

Важной вытекающей задачей данного подраздела является определение минимального значения толщины образца-пластины горной породы, несущей полноценную информацию о динамических модулях упругости и сформулировать критерии отбора и подготовки образцов малых размеров объемом от 10 см<sup>3</sup> (толщиной до 1-3 см).

По результатам оптической и электронной микроскопии в зависимости от морфометрических и структурно-текстурных особенностей было принято решение подготавливать образцы-пластины абсолютно разных толщин для пород разного генотипа. Толщины варьировались от 3 мм до 18 мм.

Так, например, для образцов магматической группы (Prx, GrV, GrM и GrU) с выраженной зернистостью были подготовлены образцы-пластины минимальной толщины 5 мм – исходя из условия среднего размера зерна породообразующего минерала и нахождения минимум 3 таких зерен в «толщине» исследования. Для образцов осадочной и метаморфической группы подготавливались образцы с толщиной не менее 3 мм.

Таблица 4.3. Группы образцов-пластин с их геометрическими параметрами.

№	Образцы горных пород	Толщины образцов пластин, мм	Общее количество подготовленных образцов-пластин
1	Dbc, Arg, Mrb	3, 6, 10, 15	221
2	Lms, Shg	5, 8, 10, 15	91
3	Prx, GrV, GrM, GrU	5, 8, 9, 12, 18	168

Каждый первый полноразмерный образец каждой отдельной породы распиливался на группу разнотолщинных образцов. Это было необходимо для уточнения, на сколько и какой толщины распиливать следующие полноразмерные образцы (со 2-ого). Все полноразмерные образцы были разрезаны на пластины в двух ориентациях (XZ и XY в соответствии со схемой на рисунке 4.5).

Так, например, образец известняка Lms 1.1 был разрезан на Lms 1.1.1 – 1.1.4 с толщинами 5, 8, 10, 15 мм, соответственно. И только образец Lms 1.2 – на 7 образцов с толщиной 5 мм, Lms 1.3 – на 5 образцов с толщиной 8 мм (в ориентации XZ) и так далее.

Общие сводные таблицы с геометрическими характеристиками и определенными свойствами подготовленных образцов-пластин из каждого полноразмерного образца горной породы приведены в *Приложении Б* (таблица Б2).

#### 4.4.2 Критерии оценки качества временной формы ультразвукового сигнала

Характерные результаты были получены с помощью эхо-режима для 4 горных пород – известняки, аргиллиты, мраморы и долериты [133]. Ниже на рисунке 4.6 представлены результаты регистрации 10 волновых форм в разных 10 точках по поверхности образца-пластины аргиллита толщиной 5,71 мм и его первичная обработка (усреднение сигнала по 10 точкам по поверхности образца-пластины).

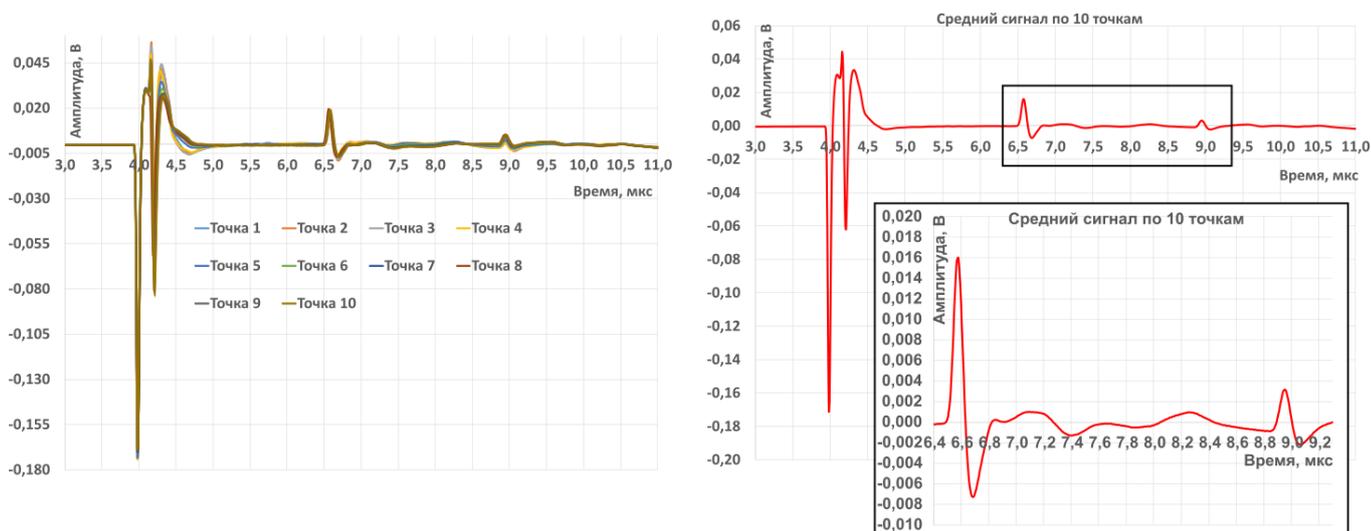


Рисунок 4.6 – Волновая форма регистрируемых сигналов в 10 точках по площади поверхности образца-пластины

Важно отметить, что при увеличении толщины образцов (известняки, аргиллиты, мраморы, долериты) качество волновой формы снижалось (амплитуда

импульсов уменьшалась, а сам импульс растягивался по времени) и интерпретация с расчётом скоростей затруднялась (для решения этой проблемы использовалась ранее разработанная аналитическая модель построения волновой формы).

Критерии оценки качества волновой формы сигнала, полученного в точке исследования по поверхности образца-пластины следующие:

1. Высокое - явно выражены импульсы продольной волны, отраженной от нижней поверхности образца, максимум импульса сдвиговой волны, а также возможно идентифицировать второе отражение волны;

2. Среднее - возможно идентифицировать максимум импульса продольной волны и, частично сдвиговой, необходимо не менее, чем  $K$  усреднений сигналов по поверхности образца. При этом  $K$  в зависимости от геоматериала и его структурно-текстурных особенностей от 5 до 30 (рисунок 4.5, б);

3. Низкое - невозможно корректно интерпретировать волновую форму сигнала и выявить максимумы импульсов двух типов волн (при этом большое количество усреднений не позволяет улучшить волновую форму сигнала).

Решением проблемы низкокачественных волновых форм является использование теневого режима диагностики с использованием необходимого для постобработки данных с использованием разработанного программного обеспечения.

Результаты, полученные на образцах гранита разной степени зернистости, были неудовлетворительными. Это обосновывалось низким качеством полученных волновых форм сигналов. Типичные полученные результаты на образцах гранита представлены ниже на рисунке 4.7. Волновые формы для образцов гранитов, с промежуточными значениями толщин вынесены в *Приложении В* (рисунки В1-В19). Важно отметить, что при выполнении данного эксперимента для улучшения его информативности не помогло ни увеличение точек сканирования по поверхности образца, ни усреднение полученных сигналов по поверхности и прочие виды обработки.

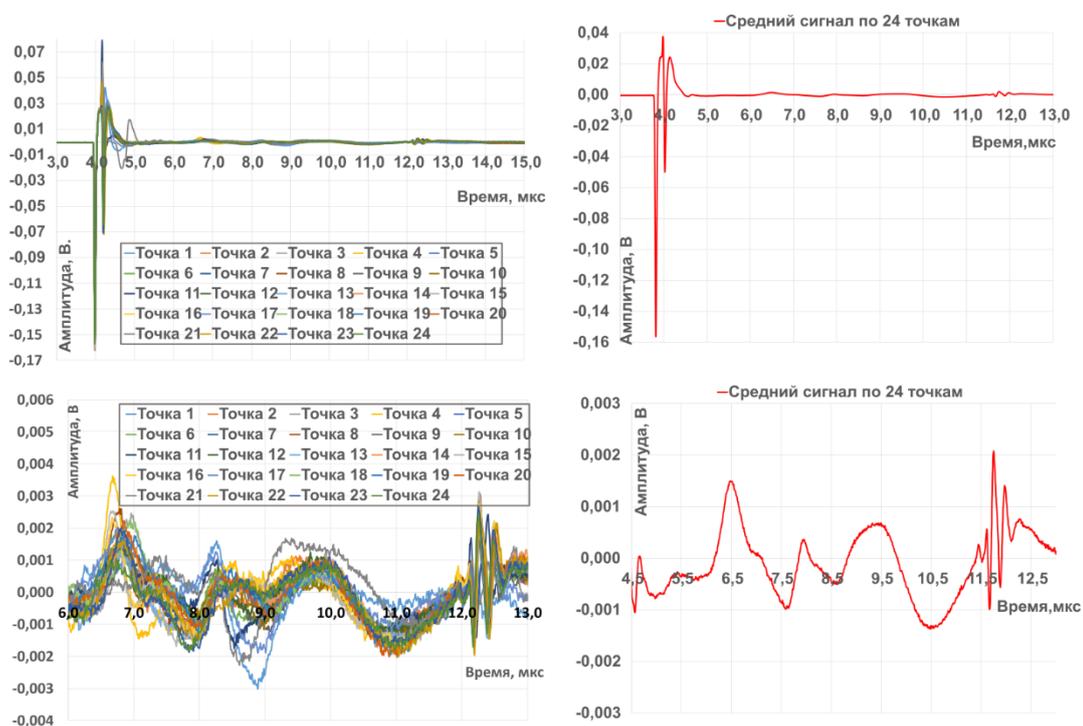


Рисунок 4.7 – Типичная волновая форма сигнала для образца горной породы с зернистой структурой, образец гранита с толщиной 5,23 мм.

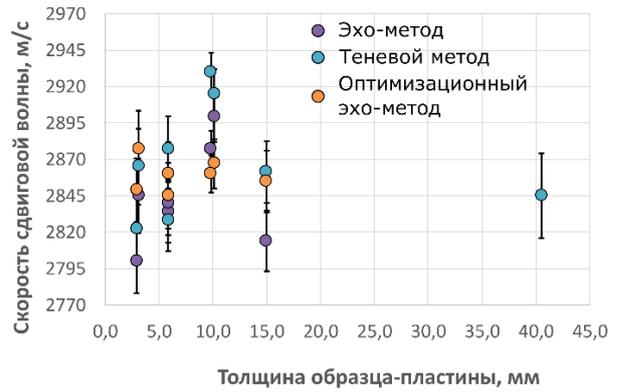
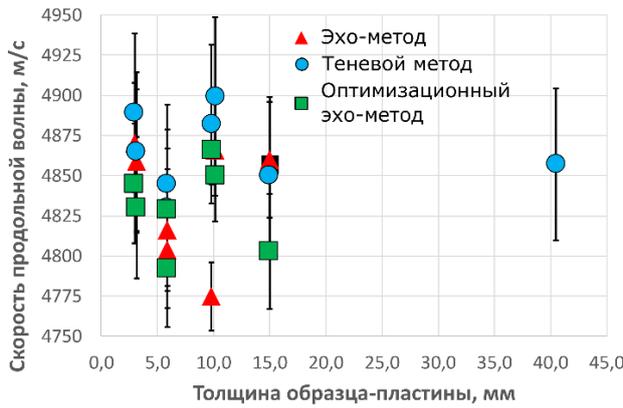
Поэтому было принято решение данные образцы-пластины исследовать повторно, но с помощью теневого режима ЛУД. Особое внимание уделялось образцам горных пород с явно выраженной зернистой структурой ввиду высокой дисперсии размеров зерен в них.

#### 4.4.3 Сравнительный анализ групповых скоростей волн в образцах горных пород, полученных разными методами

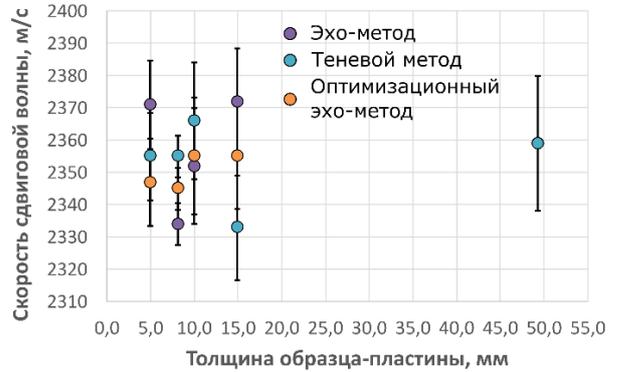
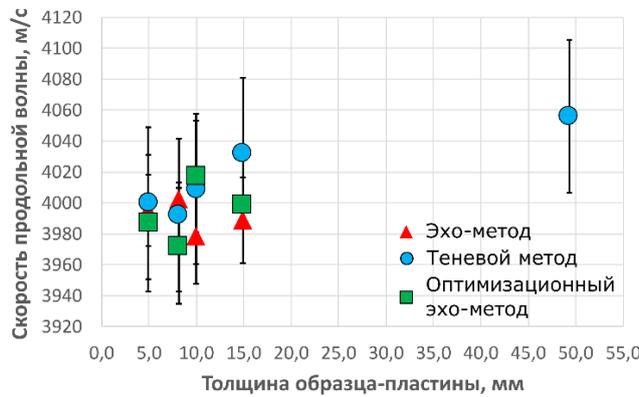
Был проведен сравнительный анализ значений скоростей, определенных на образцах-пластинах аргиллита, известняка, мрамора и долерита (диабазы) со значениями, полученными на полноразмерных образцах в теновом режиме (рисунок 4.8).

Связи скоростей упругих волн с толщинами образца - пластины (анализ каждого первого полнорамерного образца и распиленных пластин из него).

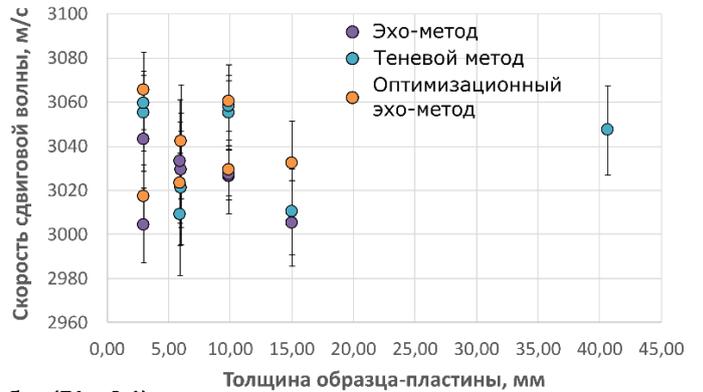
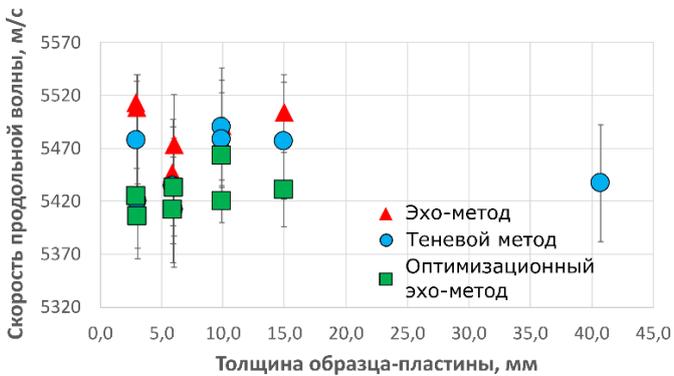
Аргиллит (Arg 4.1)



Известняк (Lms 3.1)



Мрамор (Mrb 5.1)



Диабаз (Dbs 2.1)

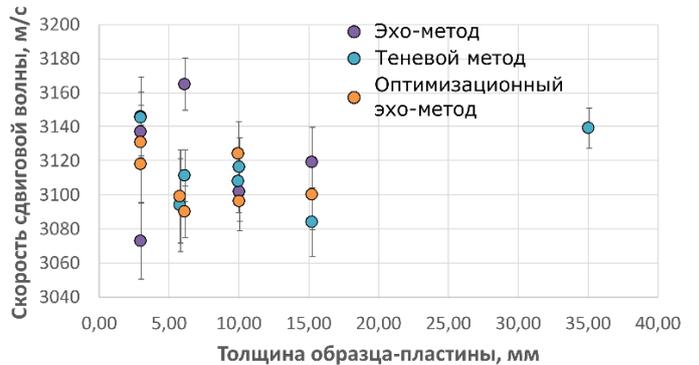
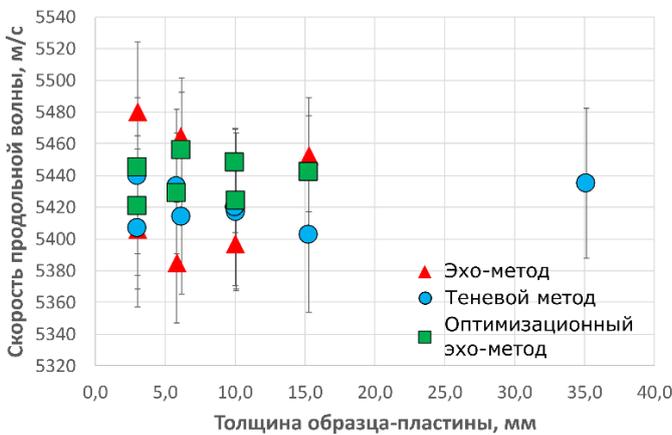


Рисунок 4.8 – Сравнительный анализ значений скоростей образцов известняка, долерита, аргиллита и мрамора, полученных при эхо и теневом режимах ЛУД

Как видно из рисунка 4.8, значения скоростей лучше сходятся, когда толщина образца-пластины увеличивалась, то есть, когда масштабное влияние было минимальным.

Ошибка определения значений скорости продольной упругой волны эхо-методом колебалась от 0,48 до 0,76%, с помощью оптимизационного эхо-метода составила от 0,27 до 0,54% и с помощью теневого метода она составила от 0,28 до 0,57%.

Ошибка для сдвиговой волны в эхо-методе колебалась от 0,76 до 1,21%, с помощью оптимизационного метода составила от 0,33 до 0,58%, а с помощью теневого метода она составила от 0,72 до 1,41%. Можно отметить, что применение оптимизационного алгоритма расчёта скоростей волн снизило значение ошибки по сравнению с эхо-методом почти в 2 раза для продольной волны и порядка 2,5 раз для сдвиговой волны.

Важно отметить, что не всегда удавалось идентифицировать сдвиговую волну по волновой форме, поэтому использовались дополнительные методы улучшения качества определения сдвиговой волны. Одним из основных был метод расчёта производной сигнала, который рассчитывался как полуразность соседних отсчётов регистрации амплитуды, кроме первого и последнего отсчётов. Тогда там, где сдвиговая волна, появиться явно выраженный пик-импульс.

Но, к сожалению, качественного улучшения определения импульсов сдвиговой волны не наблюдалось. Поэтому данный метод не был далее использован при графическом представлении результатов (определении тенденции).

При использовании разработанного оптимизационного алгоритма определения скоростей волн результаты сравнения скоростей упругих волн весьма улучшились для образцов, представленных на рисунке 4.8.

Гранит Возрождение. Связь скоростей упругих волн с толщинами образца - пластины (анализ каждого первого полнорамерного образца и распиленных пластин из него)

Гранит (GrV 7.1)

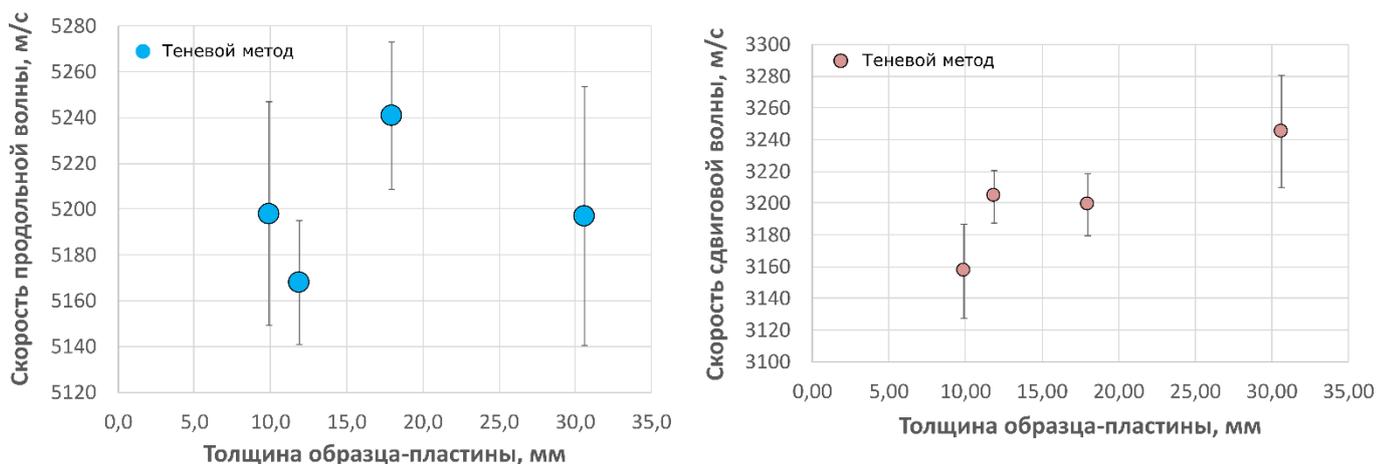


Рисунок 4.9 – Сравнительный анализ значений скоростей образцов гранитов, полученных при эхо и теневом режимах ЛУД разномасштабных образцов

На примере гранитов (образцов горных пород с явно выраженной зернистостью) была установлена следующая тенденция. Значения скоростей продольных волн в пределах ошибки сходятся для образцов-пластин толщиной 10 мм и более, что подтверждает факт о влиянии в «толщине» прозвучивания «минимального» количества минерал-слагающих зерен (ASTM требования [127]). В толщину образца от 10 мм и выше попадало двукратное и более количество 3 основных минеральных зерен. По однократному количеству зерен (образцы с толщинами 5 и 8 мм) невозможно было оценивать значения ввиду их сильного разброса относительно среднего значения, ошибка составляла порядка 10%.

Значения, представленные на графиках выше, являются значениями «групповых» скоростей волн, определенных по максимуму и минимуму импульса для продольных волн и сдвиговой, соответственно.

Для корректного сравнения скоростей волн на разномасштабных образцах необходимо оценивать дисперсию фазовой скорости.

#### 4.5 Исследование разномасштабных образцов горных пород с помощью теневого метода лазерной ультразвуковой диагностики по фазовым скоростям

#### 4.5.1 Оценка частотного диапазона для построения дисперсионных кривых

Частным случаем выражения (3.10), рассчитанного в разделе 3.6 при угле падения волны  $i_1 = 0$  является выражение:

$$C = \frac{h_s}{T - T_w + \frac{h_s}{c_w}}. \quad (4.1)$$

Здесь  $h_s$  – толщина образца,  $T$  и  $T_w$  – времена распространения импульса продольной волны в кювете с водой при наличии образца и без него, соответственно,  $c_w$  – скорость распространения продольных волн в воде.

Однако для построения дисперсионных кривых фазовых скоростей продольных волн необходимо в выражении (4.1) учитывать, что время распространения каждой гармоники в образце  $T(\omega)$  различно для разных частот. Эта зависимость, как отмечалось ранее, связана с дифракцией и затуханием, которые вносят фазовый сдвиг для каждой моды.

Для расчёта зависимости фазовой скорости от частоты воспользуемся следующими выражением, записанным для спектра  $F_{signal}(\omega)$  принимаемого сигнала, прошедшего через образец:

$$F_{signal}(\omega) = W(\omega) \cdot F_{ref}(\omega) \cdot e^{i \cdot \omega \cdot \tau(\omega) - \alpha(\omega) \cdot h_s}, \quad (4.2)$$

где  $W(\omega)$  – суммарный частотозависимый коэффициент отражения акустического сигнала от границ образца,  $F_{ref}(\omega)$  – спектр опорного сигнала, прошедшего от генератора до приемника в воде при отсутствии образца,  $\alpha(\omega)$  – коэффициент затухания,  $\tau(\omega) = T(\omega) - T_w$ . Учитывая, что время прихода  $T(\omega)$  на приемник каждой гармоники различно для разных частот. Величины, входящие (4.2), были получены с использованием разработанных программ и быстрого Фурье преобразования.

В результате деления мнимой части спектра (4.2) на его действительную выделялся фазовый спектр и находилась частотная зависимость фазовой скорости, которая имела следующий вид:

$$C_l(f) = \frac{h_s}{\Delta T + (\varphi(f) - \varphi_0(f))/2\pi f}, \quad (4.3)$$

где частота  $f = \omega/2\pi$ ,  $\Delta T$  – разница моментов прихода ультразвукового импульса, прошедшего исследуемый образец, помещенный в кювету с водой и опорного (референсного) ультразвукового сигнала. Разность фаз  $\varphi(f) - \varphi_0(f)$  возникает из-за искажения временной формы регистрируемых импульсов, связанной с дисперсией фазовой скорости, которая обусловлена как затуханием, так и дифракцией.

При этом наибольший вклад в частотную зависимость скорости вносит дифракция. Поэтому оценим частотный диапазон, для которого дифракция существенна при стандартной длине исследуемых образцов 30-40 мм.

Для этого воспользуемся выражением для длины дифракции  $L_d$  (расстояние, на котором радиус гауссова пучка увеличивается в  $e$  раз).

$$L_d = \frac{ka^2}{2} = \frac{\omega a^2}{2c} = \frac{2\pi f a^2}{2c} = \frac{\pi f a^2}{c}, \quad (4.4)$$

где  $a$  – апертура источника, равная 1,5 см для установки Геоскан-02МУ,  $c$  – ориентировочная скорость распространения продольной или сдвиговой волны в исследуемом образце, м/с.

Для частотного диапазона (0,1-3) МГц при скоростях распространения продольных волн (4 500 – 5 500) м/с длина дифракции  $L_d$  меняется от значения 1,5 см для частоты  $f=100$  кГц до 10 см на частоте 500 кГц, и 40 см на частоте 2 МГц.

При этом дополнительная разность фаз, возникающая из-за дифракции, колеблется от  $\pi/3$  для  $f_1=100$  кГц до  $0,1\pi$  для  $f_2=500$  кГц и  $0,03\pi$  для  $f_3=2$  МГц.

Таким образом, в частотном диапазоне 100-500 кГц дополнительный сдвиг фазы волны изменяется от  $\pi/3$  до  $0,1\pi$ , который может приводить к значительному изменению фазовой скорости в данном диапазоне, что необходимо учитывать при измерении скоростей упругих волн.

#### 4.5.2 Алгоритм расчёта дисперсионных кривых фазовой скорости упругих волн в разномасштабных образцах горных пород

Для построения дисперсионных кривых (зависимости фазовой скорости волны от частоты) с использованием выражений (4.2-4.3) использовался написанный код на языке Python.

Алгоритм проведения расчёта представлен в таблице 4.4 ниже и полученные с использованием данного алгоритма спектры приведены на рисунке 4.10 для полноразмерного образца Mrb 5. 1 толщиной 40 мм. На рисунке 4.11 приведены также дисперсионные кривые фазовых скоростей для исследуемых образцов

Таблица 4.4. Алгоритм и функции обработки в Python

Шаг	Операция
1	Выбираем сигнал, полученный при нормальном падении на образец (рис. 4.10, А). При нормальном падении определяем временной профиль продольной волны, при некоторых углах падения идентифицируются сдвиговые волны.
2	Умножаем данный сигнал на оконную функцию в виде гауссовой кривой (выделена синим цветом на рис. 4.10, А) для выделения импульса соответствующего пика волны и отсечки шумовых компонент.
3	Вычисляем комплексный спектр сигнала с помощью быстрого Фурье-преобразования $F_{signal}(\omega)$ для сигнала, прошедшего образец
4	Операции 1-3 повторяем для референсного сигнала (рис. 4.10, Б), выделяя

	$F_{ref}(\omega)$ для сигнала прошедшего через кювету с водой
5	Выделяем из комплексных спектров действительные части, соответствующие амплитудным спектрам (рис. 4.10, В). Из рис. 4.10 В видно, что в спектре прошедшего через образец сигнала отсутствуют частоты выше 3 МГц. Поэтому все дисперсионные кривые необходимо ограничивать данной частотой.
6	Находим фазовый спектр $\varphi(\omega)$ , получаемый делением мнимой части $F_{signal}(\omega)$ на действительную часть $F_{signal}(\omega)$ , из $\varphi(\omega)$ определяем частотную зависимость фазовой скорости $C(\omega)$ (рис. 4.10, Г)

## Mrb 5.1

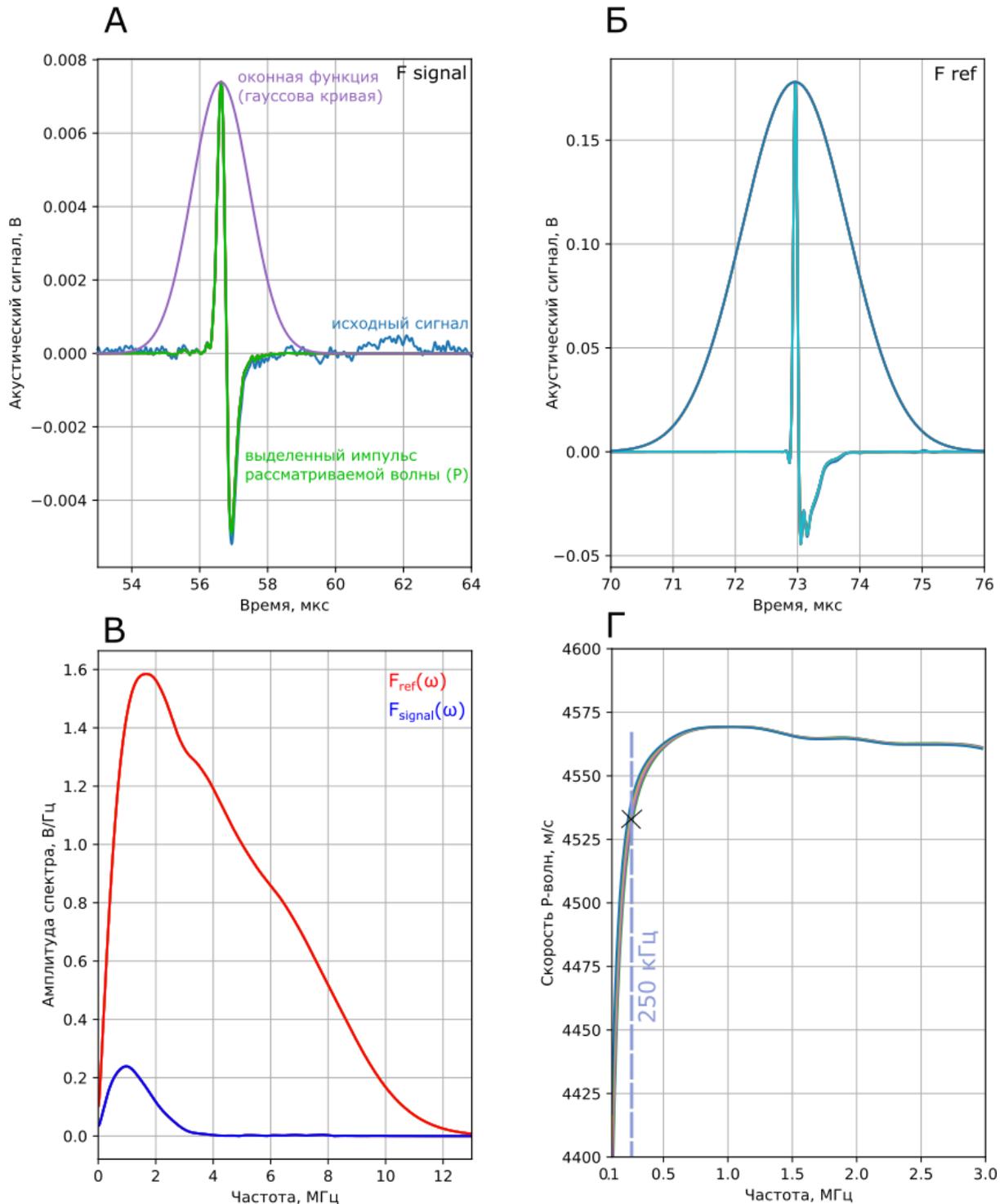


Рисунок 4.10 – Пример типовой обработки сигнала, полученного на полноразмерном образце мрамора (Mrb 5.1) с помощью теневого режима работы ЛУД. А – Сигнал импульса (в данном случае, продольной) волны при определенном угле поворота образца (в данном случае, при 0 градусов) с построенной оконной функцией, Б – исходный, отфильтрованный референсный сигнал и оконная функция для него, В – построенная зависимость амплитуды спектра от частоты для референсного сигнала (кривая красного цвета) и сигнала, прошедшего через образец (синего цвета), Г – построенная зависимость значения скорости продольной волны от частоты в полосе от 0,1 МГц

Измерения теневым методом были проведены для всех полноразмерных образцов горных пород. Анализируя построенные дисперсионные кривые, можно выделить несколько интервалов частот, при которых есть резкое изменение значения фазовой скорости и стабилизация значений скорости волны. Соответствующие диапазоны частот и интервалы значений скоростей приведены в таблице 4.6.

Так, например, анализируя результаты, полученные для образца мрамора (рисунок 4.10), можно сделать вывод, что значение скорости волны стабилизируется в среднем при 500 кГц. Из таблицы 4.5 видно, что разброс скоростей для большинства образцов горных пород в диапазоне 100-500 кГц составляет 5-15%, в то время, как при частотах 500 кГц – 3 МГц этот разброс становится менее 1%. Дисперсионные кривые фазовых скоростей для образцов, перечисленных в таблице 4.6, приведены на рисунке 4.11.

Таблица 4.5. Значения скоростей продольных волн в образцах в различных частотных диапазонах

№	Образец	Полоса частот, МГц	Интервал скорости, м/с	Средняя скорость, м/с	Разброс, м/с	Полоса частот, МГц	Средняя скорость, м/с	Разброс, м/с
1	Prx 1.1	0,1-1	5700-5350	5475	225	1-2,5	5325	30
2	Dbc 2.1	0,1-0,5	5175-5110	5140	35	0,5-2,8	5112	10
3	Lms 3.1	0,1-0,5	3600-3950	3775	175	0,5-2,0	3980	30
4	Arg 4.1	0,1-0,5	4950-4775	4862	175	0,5-3,5	4780	11
5	Mrb 5.1	0,1-0,5	4400-4560	4480	80	0,5-3,0	4562	13
6	Shg 6.1	0,1-0,4	2000-4100	3050	1050	0,5-2,2	4120	20
7	GrV 7.1	0,1-0,5	3800-5130	4465	665	0,5-2,1	5185	56
8	GrM 8.1	0,1-0,25	4600-5140	4870	270	0,25-1,75	5135	20
9	GrU 9.1	0,1-1,5	5100-5365	5233	133	1,5-2,3	5365	5

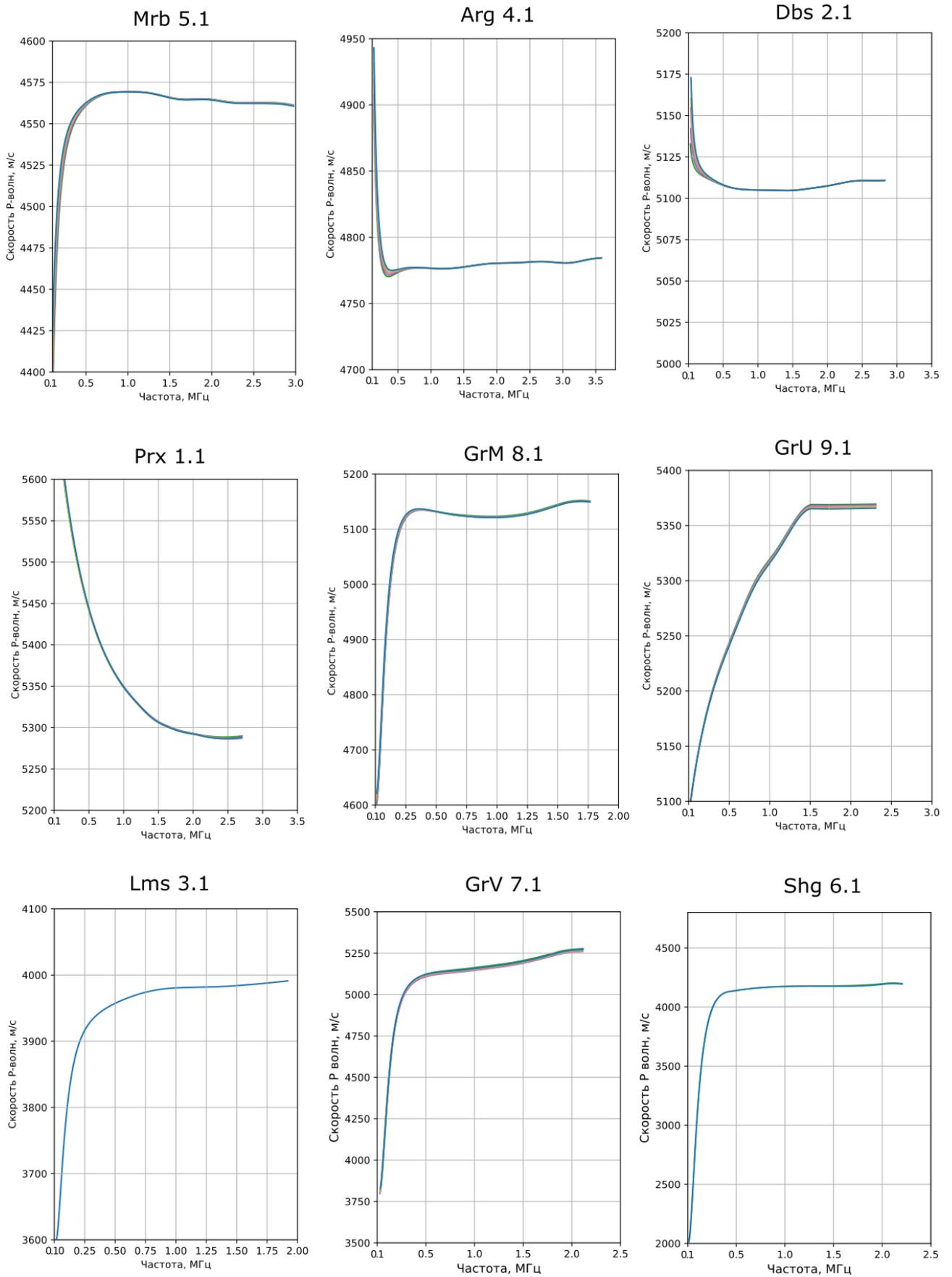


Рисунок 4.11 – Дисперсионные кривые для различных образцов, исследуемых с помощью теневого режима работы ЛУД при угле поворота образца  $0^\circ$ , в полосе частот от 100 кГц

Как было показано выше, для полноразмерных образцов погрешность в измерении скоростей упругих волн не превышала 1% в частотном диапазоне 500 кГц - 3 МГц. Однако переход к тонким пластинам приводил к существенному отклонению от полученных значений как в теневом режиме, где измерялась фазовая скорость, так и в эхо режиме при измерении групповой скорости. В первую очередь это было связано с различным вкладом дифракции в дисперсию скоростей. Для полноразмерных образцов амплитуда низкочастотных гармоник (100-500 кГц) резко уменьшалась, что приводило к дополнительному искажению временной формы, в то время, как на тонких пластинах влияние дифракции было ничтожно мало. Поэтому необходимо было разобраться, как выбрать частотный диапазон, в котором влияние дифракции минимально, а фазовая и групповая скорость должны совпадать.

Кроме того, при использовании теневого иммерсионного режима ЛУД на регистрацию времен распространения импульсов  $P$  и  $S$  волн дополнительно сильно влияли следующие факторы:

1. Подготовка низкого качества образцов для испытаний (несоблюдение параллельности граней, клиновидность образцов);

2. Несоблюдение осей диаграмм направленности генератора и приемного элемента.

Данные факторы влияния (назовем их юстировочными) приводили к погрешности времени регистрации импульсов волн при использовании установки Геоскан-02МУ в среднем порядка 0,9-1,3 мкс (по оценкам из экспериментальных данных), что в свою очередь приводило к большой относительной ошибке определения скорости до 14%.

#### 4.6 Сравнение групповых и фазовых скоростей упругих волн разномасштабных образцов горных пород

Для сравнения результатов, полученных двумя методами ЛУД для продольных волн была найдена связь групповой скорости  $C_{gr}$ , определяемой в эхо-режиме и фазовой  $C(\omega)$ , получаемой в режиме проходящих волн (в соответствии с работами [134-137]). По определению групповая скорость  $C_{gr}$ :

$$C_{gr} = \frac{d\omega}{dk}, \quad (4.5)$$

где волновое число  $k(\omega) = \omega / C(\omega)$ .

Выразим групповую скорость через фазовую скорость  $C(\omega)$  для каждой гармоники:

$$C_{gr} = \frac{1}{dk/d\omega} = \frac{1}{\frac{1}{C(\omega)} \frac{C'(\omega)}{C^2(\omega)} \omega} \quad (4.6)$$

Из выражения (4.6) следует, что в области, где  $C'(\omega) = 0$  или  $C(\omega) = const$ , фазовая и групповая скорости продольных волн совпадают  $C_{gr} = C(\omega)$ .

Как было показано в предыдущем параграфе, практически для всех образцов горных пород различных генетических типов в частотном диапазоне 500 кГц-3 МГц, где  $C'(\omega) = 0$ . Это означало, что для корректировки групповой скорости, измеряемой в эхо-режиме на установке УДЛ-2М, необходимо было выставлять фильтр таким образом, чтобы зарезались частоты, ниже 500 кГц.

4.6.1 Временные поправки для теневого метода, необходимые для корректного сравнения с результатами оптимизационного метода

Для определения временной поправки, связанной с юстировочными факторами использовался датчик (совмещенный приемник-генератор – ПЛУ-6Н-02-2) от установки УДЛ-2М, работающей в эхо-режиме, но приемник использовался как генератор с узкой апертурой излучения в 3 мм. Приемным

элементом использовался приемник от установки Геоскан-02МУ. Данный метод является теневым и сокращенно назовем его «юстировочный теневой метод».

Получившаяся собранная установка продемонстрирована на рисунке 4.12 ниже.

Такая реализация в виде прямого теневого режима позволяет избавиться от юстировочных факторов погрешности, появляющихся в иммерсионном режиме и позволяет определить только скорость распространения продольной волны.

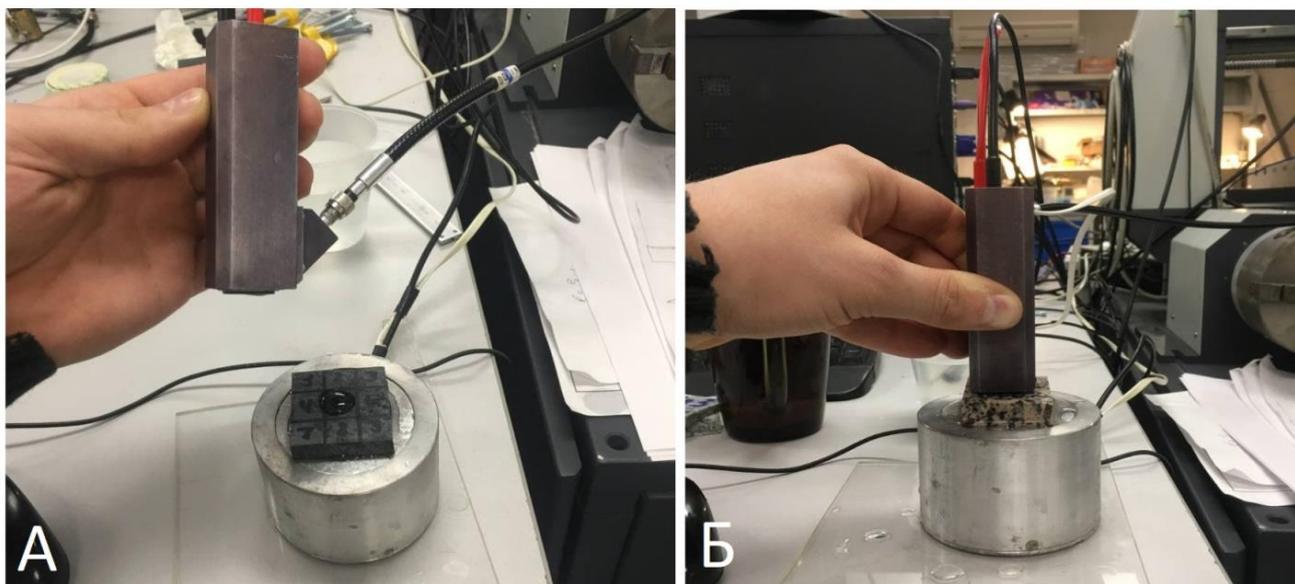


Рисунок 4.12 – Определение скорости звука образцов-пластин пород с помощью совмещенной системы ЛУД, генератор от УДЛ-2М, приемник от Геоскан-02МУ

Пробные эксперименты на образцах аргиллита (Arg 4.1 и пластин, подготовленных из него) оказались весьма успешными ввиду низкой относительной ошибки при их сравнении. Отклонение составило 44 м/с, что менее 1% относительно среднего значения скорости, полученного по дисперсионной кривой в полосе частот от 1,0 МГц.

Ниже представлены зависимости скорости волны от частоты для образцов аргиллита толщиной от 3 до 63 мм (рисунок 4.13).

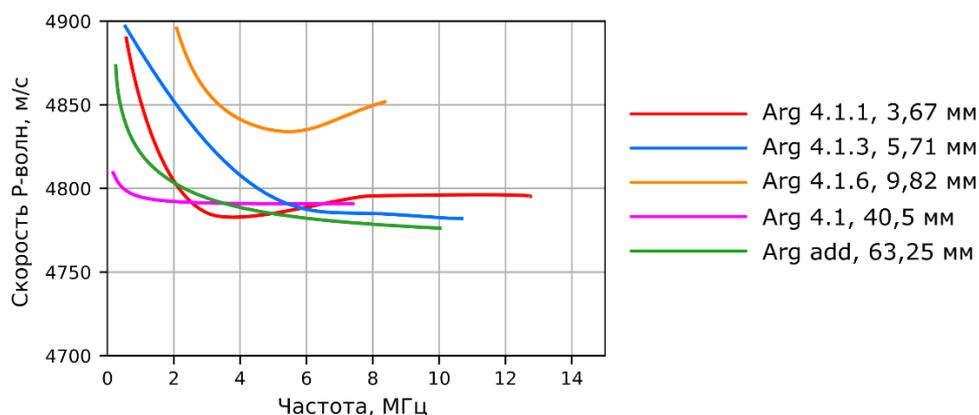


Рисунок 4.13 – Построенные дисперсионные кривые, полученные с помощью юстировочного теневого метода на образцах аргиллитов

Таким образом, можно рассчитать временные поправки и внести их в результаты, полученные с помощью теневого режима работы с помощью Геоскан-02МУ. Карты распределения амплитуды сигнала импульсов продольных и сдвиговых волн от времени распространения импульса при определенном угле падения в образцах, которые были вынесены в *Приложение Г*, не требовали корректировок, а значения скоростей и модулей были рассчитаны с помощью построенных дисперсионных кривых с введенными в расчёты временными поправками. Коррекция расчётов дисперсионных кривых представлена графически ниже на рисунке 4.14 на примере образцов аргиллита и на примере гранитов (Возрождение) на рисунке 4.15.

Численное значение временной поправки вводилось в  $T(i_1)$  в выведенной ранее универсальной формуле 3.10 (подраздел 3.4.3), с помощью которой и производятся основные расчёты.

Поскольку в юстировочном теневом режиме генерируется, распространяется и регистрируется один тип волны ( $P$ ), данный режим является вспомогательным и юстировочным, который позволяет рассчитать временную поправку.

*Теневой метод* является одним из основных режимов работы ЛУД по причине реализации в нем поворота образца, который позволяет сгенерировать сдвиговые волны, распространяющиеся в полноразмерном образце и зарегистрировать их.

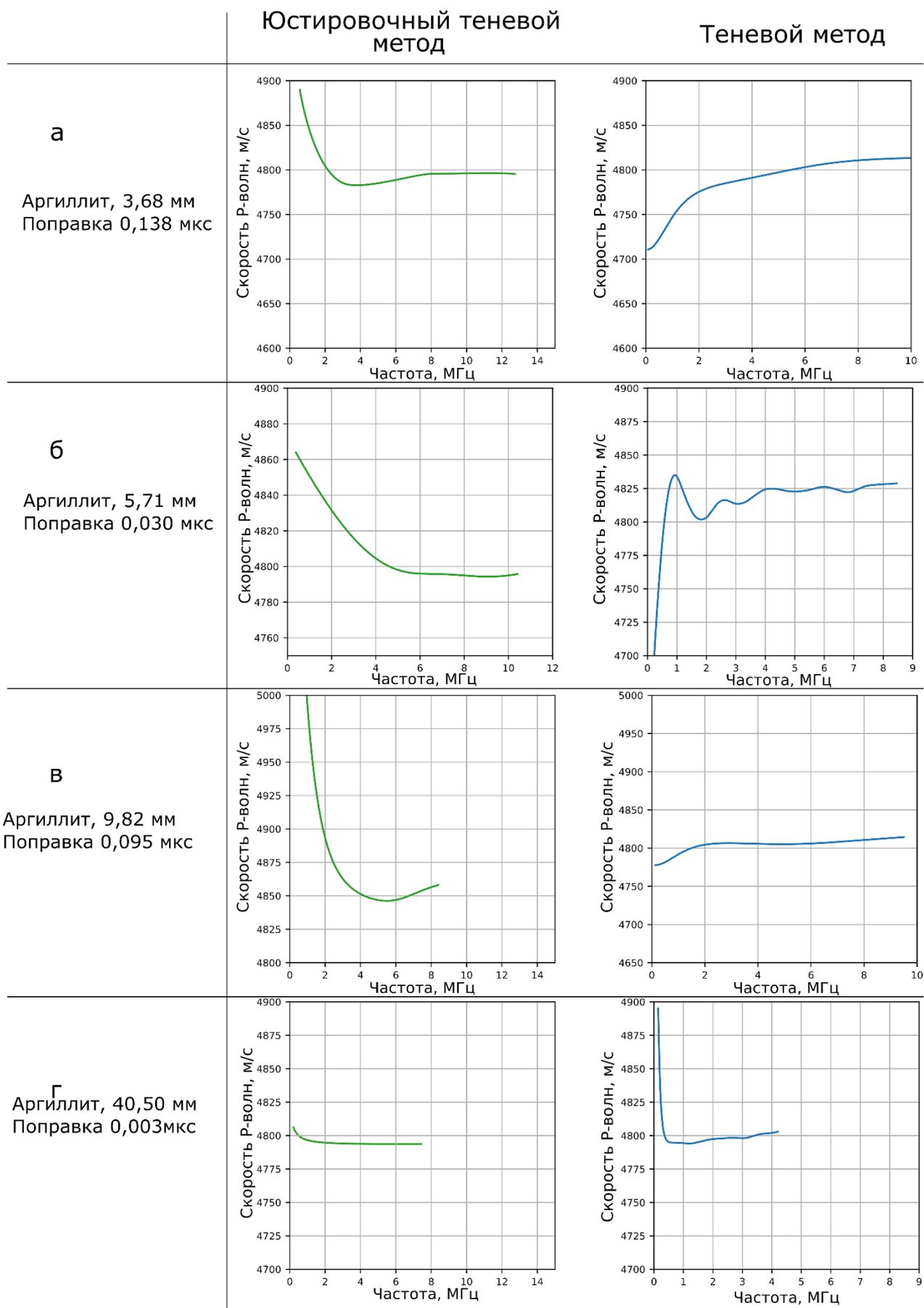


Рисунок 4.14 – Результаты построенных дисперсионных кривых с внесенными временными поправками для каждого из образцов аргиллита

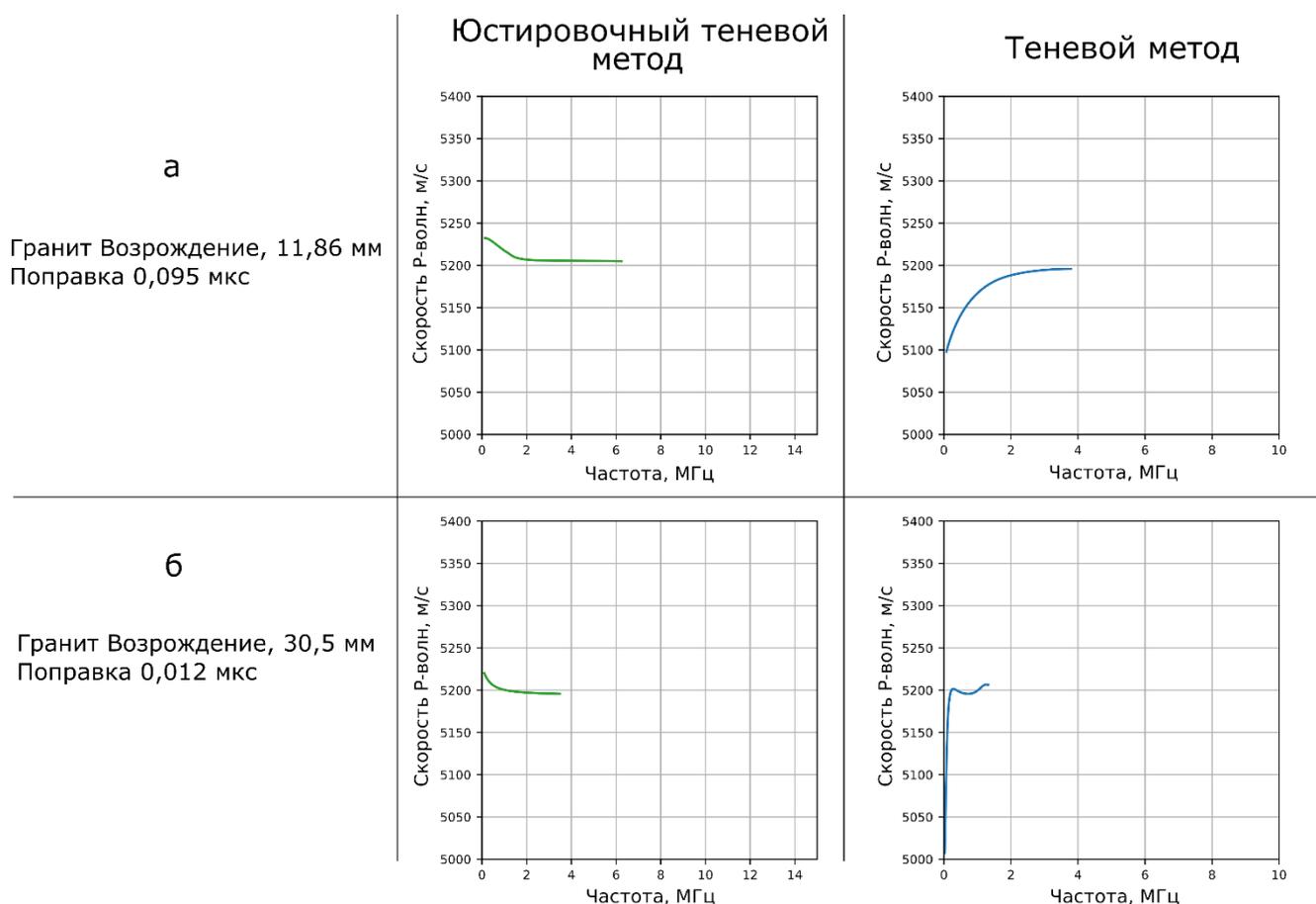


Рисунок 4.15 – Результаты построенных дисперсионных кривых с внесенными временными поправками для каждого из образцов гранита Возрождение

Поправки для группы образцов аргиллитов варьировались от незначительного значения в 0,003 мкс (для полноразмерного образца) до 0,138 мкс – образца-пластины самой наименьшей толщины в 3,68 мм.

Аналогичные процедуры определения поправки были проделаны и для оставшихся образцов метаморфической и осадочной группы. Значение максимальной поправки не превышало 0,141 мкс (для образца-пластины Lms 3.2.5).

Важно отметить, что численное значение введенной временной поправки ниже, когда толщина исследуемого образца увеличивалась. Это дополнительно подтверждает влияние юстировочных процессов.

Стабилизация значения скорости волны в образце-пластине гранита Возрождение по отношению к полноразмерному образцу проявлялось на образцах-пластинах толщиной приблизительно от 12 мм, то есть в данную

проекцию прозвучивания попадало минимум трехкратный набор разноминеральных зерен, слагающих породу. Данный факт хорошо согласуется с исследованиями по влиянию состава и строения пород на их упругие свойства [1].

Похожие результаты наблюдались и для гранитов других месторождений с разным минеральным составом и размерами зерен.

Аналогичным образом были определены временные поправки для всех образцов, внесены корректировки в расчёт скоростей и рассчитаны динамические модули упругости.

#### 4.7 Анализ рассчитанных динамических модулей упругости разномасштабных образцов горных пород различных генотипов

Анализируя полученные результаты на образцах разных генетических групп и структур, можно составить сравнительную таблицу возможностей различных методов ЛУД в следующем виде – таблица 4.6.

Таблица 4.6. Сравнительная таблица полученных результатов.

№	Горная порода	Генотип	Текстура, структура, хар. размеры элементов	Качество определения скоростей волн ЛУД		
				Эхо-метод	Оптимизационный эхо-метод	Теневой метод с поправками T0-mode
1	Prx	Магм.	Массивная, полнокристаллическая	Среднее	Высокое	Высокое
2	Dbx		Массивная, полнокристаллическая	Высокое, от 2 мм	Высокое	Высокое
3	Lms	Осадоч.	Пористая, органогенная (поры ~150 мкм)	Высокое, от 3 мм	Высокое	Высокое
4	Arg		Массивная, пелитовая	Высокое, от 1 мм	Высокое	Высокое
5	Mrb	Метам.	Массивная, непористая, кристаллобластовая	Высокое, от 3 мм	Высокое	Высокое
6	Shg		Массивная, пелитовая	Среднее	Высокое	Высокое
7	GrV	Магм.	Неравномернозернистая, зерна от 100 мкм до 5 мм, текстура массивная, трахитоидная	Плохое	Среднее	Высокое
8	GrM		Однородная,	Плохое	Среднее	Высокое

			неравнозернистая, зерна от 100 мкм до 5 мм			
9	GrU		Однородная, мелкозернистая, зерна от 500 мкм до 3 мм	Плохое	Среднее	Высокое

Скорости продольной волны, определенные с помощью разработанной аналитической модели (оптимизационный эхо-метод, подраздел 3.1) на основе эхо-метода, для образцов-пластин аргиллита толщиной более 6 мм не расходились в пределах 1,5 %, а сдвиговых более 3% (в то время как эхо-метод показал приблизительно такой же результат 1,9% и 4%, соответственно)

Для дальнейших пояснений введем следующие обозначения:  
 $E(C_{f_{X-YMHz}})_{plates}^{dyn. T-mode}$  – динамический модуль упругости («dyn» - dynamic) образцов-пластин (plates) или полноразмерных образцов (full-size sample), рассчитанный по значениям скоростей волн разных типов, определенных по дисперсионным кривым в диапазоне частот  $X - Y$  МГц ( $C_{f_{1-4MHz}}$ ) с помощью теневого иммерсионного режима работы ЛУД (теневого метода).

$E(C_{gr})_{plates}^{dyn. R-mode (opt)}$  – ДМУ образца-пластины образца, рассчитанный по групповым скоростям, которые были определены по лучшей волновой форме сигнала с помощью оптимизационного («opt» - optimization) алгоритма (разработанного в подразделе 2.3). При рассмотрении результатов, полученных на образцах горных пород, данный модуль определялся как среднее значение ДМУ, определенных на образцах-пластинах каждого соответствующего полноразмерного образца.

Ниже на рисунке 4.16 представлены в графическом виде значения рассчитанных ДМУ для образцов аргиллитов (образцы Arg 4.2 – 4.10) и в таблице 4.7.

Таблица 4.7. Численное представление результатов, аргиллиты.

№обр.	$h_s$ , мм	Количество пластин, шт	$E(C_{gr})_{plates}^{dyn. R-mode (MB)}$	СКО, ГПа	$E(C_{f_{X-Y MHz}})_{full size}^{dyn. T-mode}$	Ошибка, ГПа
Arg 4.2	3	14	51,8	0,8	52,6	0,4
Arg 4.3	6	8	50,0	0,8	49,7	0,4
Arg 4.4	10	5	49,5	0,4	49,4	0,3
Arg 4.5	3	14	50,2	1,6	50,4	0,3
Arg 4.6	6	8	51,6	0,4	51,6	0,4
Arg 4.7	10	5	50,5	0,2	50,7	0,3
Arg 4.8	3	6	52,2	0,9	51,1	0,3
Arg 4.9	6	4	51,6	0,8	50,5	0,4
Arg 4.10	10	2	52,9	0,2	53,0	0,3

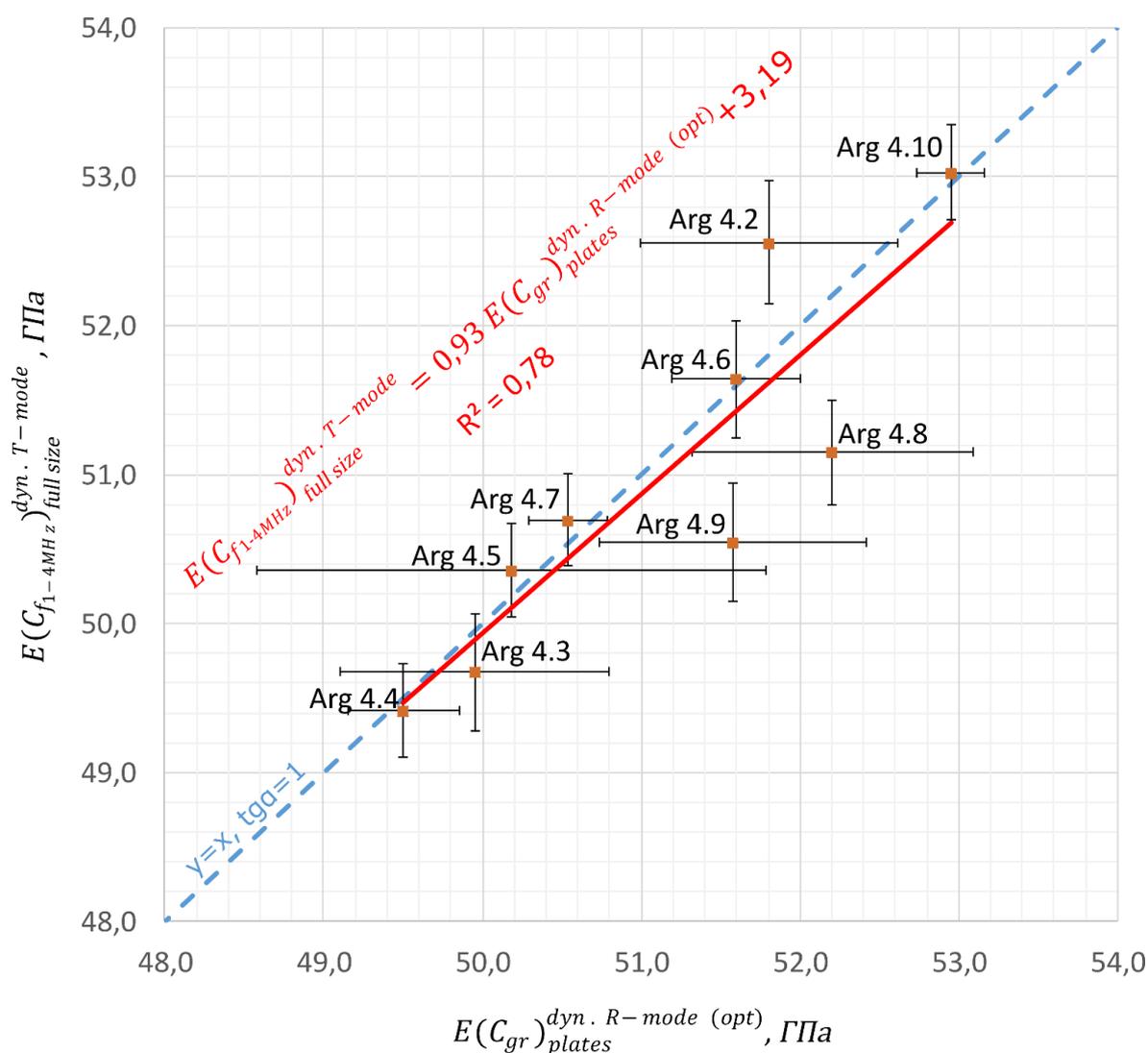


Рисунок 4.16 – Связь значений ДМУ образцов-пластин и полноразмерных образцов аргиллита

Как видно по графику, незначительные отличия значений ДМУ для аргиллитов были определены для полноразмерных образцов 4.4, 4.7, 4.10 и 4.6 и

подготовленных из них образцов-пластин, которые обладали толщиной порядка 10 мм. Разница ДМУ для данных образцов составила порядка 0,1 ГПа.

У образцов 4.4, 4.7, 4.10 было установлено самое наименьшее среднеквадратическое отклонение (СКО) ДМУ по образцам-пластинам до 0,4 ГПа. Так, например, для образца 4.5 СКО ДМУ по трехмиллиметровым образцам-пластинам составило 1,6 ГПа.

Также важно отметить, что относительная ошибка ДМУ по образцам пластинам доходила до 1,7%, полноразмерных образцов до 0,8%.

При проведении аппроксимации полученных данных линейной функцией было установлено, что коэффициент детерминации  $R^2 = 0,78$  при полученном уравнении  $E(C_{f_{1-4MHz}})_{full.size}^{dyn. T-mode} = 0,93E(C_{gr})_{plates}^{dyn. R-mode (opt)} + 3,19$ .

Аппроксимировались полученные данные и другими функциями, во всех случаях коэффициент детерминации показал высокое значение ( $R^2 > 0,75$ ), что гласит о высокой тесноте связи данных.

Таким образом можно сделать вывод, что практически  $E(C_{f_{1-4MHz}})_{full.size}^{dyn. T-mode} = E(C_{gr})_{plates}^{dyn. R-mode (opt)}$  для образцов аргиллитов Arg 4.2 – Arg 4.10. То есть ДМУ полноразмерного образца аргиллита численно равен среднему значению ДМУ образцов-пластин аргиллита, подготовленных из него, что равносильно оценке ДМУ полноразмерного образца по одному образцу-пластине, учитывая низкие значения СКО образцов-пластин с толщинами от 10 мм [138].

Аналогичные выводы были сделаны и по образцам гранитов других типов, где важным фактором определения минимальной толщины образца-пластины для оценки ДМУ является средний размер зерна.

Значения ДМУ для полноразмерных образцов гранита и образцов-пластин, подготовленных из них представлены в таблице 4.8 и в графическом виде на рисунке 4.17.

Таблица 4.8. Численное представление результатов, граниты Возрождение.

№ обр.	$h_s$ , мм	Количество пластин, шт	$E(C_{f_{X-Y MHz}})_{plates}^{dyn. T-mode}$	СКО, ГПа	$E(C_{f_{X-Y MHz}})_{full size}^{dyn. T-mode}$	Ошибка, ГПа
GrV 7.2	10	5	58,8	0,6	58,4	0,4
GrV 7.3	12	4	59,6	0,2	59,1	0,4
GrV 7.4	18	3	60,2	0,1	60,3	0,5
GrV 7.5	10	5	59,3	0,5	59,2	0,4
GrV 7.6	12	4	58,2	0,5	57,9	0,4
GrV 7.7	18	3	61,1	0,2	60,8	0,5
GrV 7.8	10	5	59,0	0,8	59,7	0,4
GrV 7.9	12	4	59,1	0,2	58,9	0,4
GrV 7.10	18	3	59,9	0,3	59,9	0,5

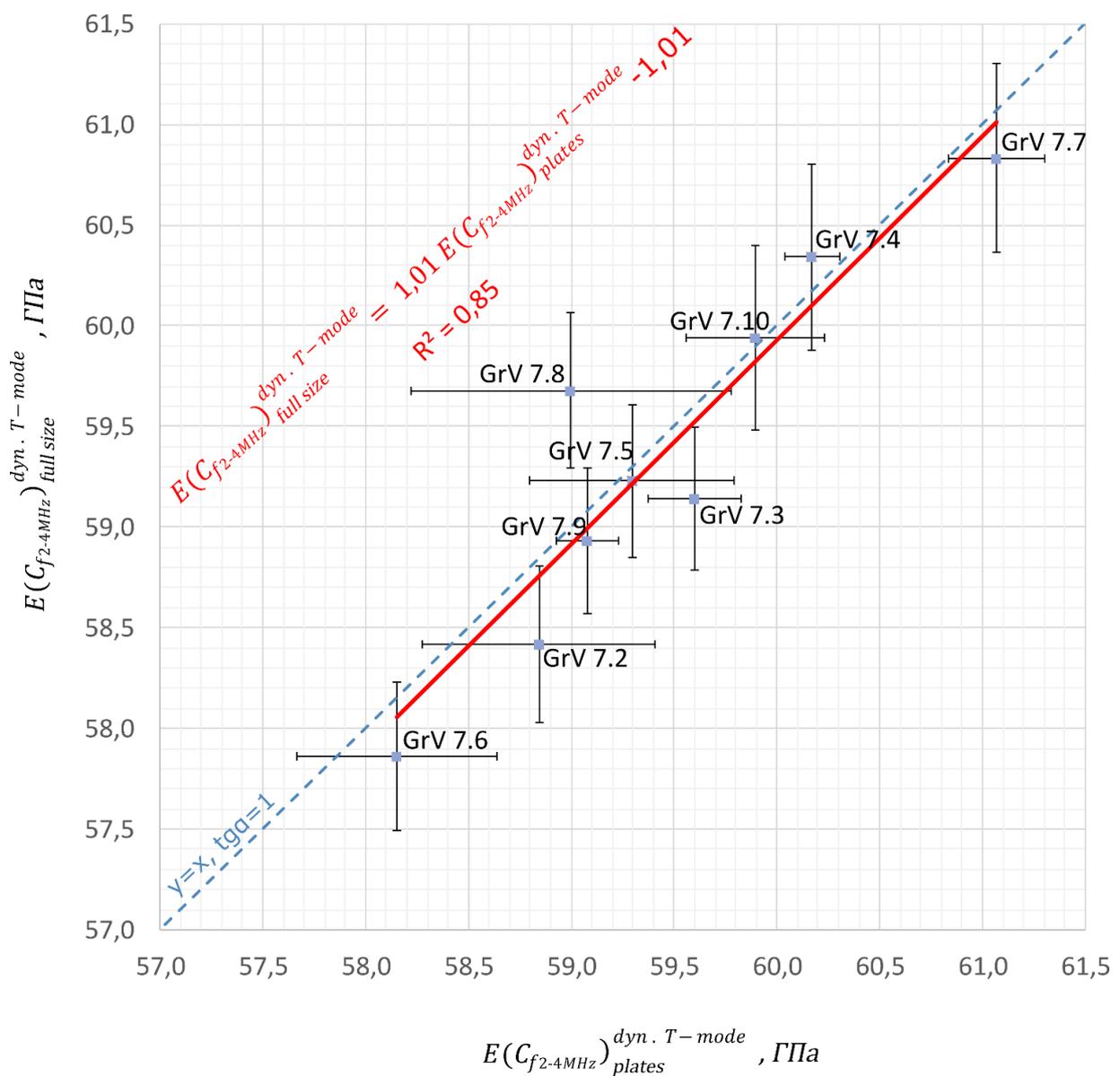


Рисунок 4.17 – Связь значений ДМУ образцов-пластин и полноразмерных образцов гранитов Возрождение

Стоит отметить, что все полноразмерные образцы обладали практически равным значением ошибки ДМУ около 0,5 ГПа, что гласит о прецизионности косвенных измерений. Наименьшие значения СКО порядка 0,2 ГПа были у образцов толщиной порядка 18 мм (3-4 кратное количество основных минеральных зерен, слагающих данную породу попадало в данную область прозвучивания).

Важно отметить, что ДМУ как полноразмерных, так и образцов-пластин гранитов определялись с помощью теневого метода. Для их расчёта использовались стабильные значения скоростей упругих волн в интервале частот от 2 МГц, определенных по дисперсионным кривым.

Учитывая, что данные хорошо аппроксимировались с помощью линейной функции и коэффициент детерминации составил  $R^2 = 0,85$ , это указывает на сильную тесноту корреляционной связи ДМУ, определенных на разномасштабных образцах горных пород.

Таким образом, можно сделать вывод, что  $E(C_{f_{2-4MHz}})_{full.size}^{dyn. T-mode} = E(C_{f_{2-4MHz}})_{plates}^{dyn. T-mode}$  для образцов гранитов Возрождение GrV 7.2-GrV 7.10.

Систематические результаты были получены и на других образцах горных пород, исследуемых в рамках данной работы [139].

Также важно отметить, что для других образцов горных пород частотный диапазон определений среднего значения фазовой скорости волн смещался в верхней границе незначительно, до 4,9 МГц, а нижняя граница смещалась не ниже 0,5 МГц. Критерием выбора нижней и верхней границы частот, при котором определялось значение скорости волны было его низкое относительное отклонение около одного уровня, не ниже 0,2% (как на примере гранитов на рисунке 4.15, В).

С помощью полученных результатов можно сформулировать методические рекомендации для акустических исследований с целью оценки динамических модулей упругости с помощью лазерной ультразвуковой диагностики.

## 4.8 Выводы

Основными результатами четвертого раздела можно выделить, что:

- Для корректной оценки значений скоростей необходимо отбирать ненарушенные образцы горных пород в соответствии с ASTM [127], а также с высокими показателями TCR, RQD и SCR;
- Динамический модуль упругости горной породы может быть оценен по образцу-пластине, подготовленной из ненарушенного объема горной породы без явных структурных неоднородностей;
- Установлено, что при определении скоростей упругих волн разномасштабных образцов сильное влияние на сходимость результатов оказывает дифракция. Для частотного диапазона 0,1-3 МГц при скоростях распространения продольных волн 4 500 – 5 500 м/с длина дифракции  $L_d$  меняется от значения 1,5 см для частоты  $f=100$  кГц до 10 см на частоте 500 кГц, и 40 см на частоте 2 МГц;
- Дисперсионные кривые фазовых скоростей строились в интервале частот от 100 кГц, которые обычно соответствуют используемым УЗ датчикам, рекомендуемым методиками ASTM D2845-08 (ISRM) и ГОСТ 21153-7.75 (от 75 кГц до 3 МГц);
- Было установлено, что для крупнозернистых пород (пироксенит, некоторые граниты) в полосе от 75 до 500 кГц скорости упругих волн значительно отличаются, более, чем на 15 % от стабильного среднего значения в полосе от 500 кГц до 3 МГц;
- Частотно стабильные значения скоростей волн были установлены для аргиллита, мрамора, известняков и долеритов, что в свою очередь связано с их структурой;
- Разработанный *оптимизационный алгоритм* позволил качественно и количественно улучшить результаты определения скоростей упругих волн, полученные на аргиллитах, мраморах и долеритах и водонасыщенном известняке, а именно: явно выразить импульсы

- продольной волны, отраженной от нижней поверхности образца, идентифицировать максимум импульса сдвиговой волны, также зарегистрировать импульс продольной волны, соответствующий второму отражению от тыльной поверхности;
- С помощью использования оптимизационного метода удалось приблизить расчётные значения скоростей упругих волн с точностью до 1 % относительно экспериментально полученных с помощью эхо-метода;
  - Для пород с явно выраженной зернистостью (все виды гранита и пироксенит) применение оптимизационного метода было не корректно ввиду временных форм сигналов, экспериментально полученных на УДЛ-2М в эхо-режиме, низкого качества;
  - Показано, что для образцов горных пород с явно выраженной зернистостью, где размер зерен колеблется от 1 мм до 4 мм, ДМУ необходимо определять по скоростям, полученным иммерсионным теньвым режимом ЛУД;
  - Ввиду сильного влияния юстировочных факторов для теневого иммерсионного режима необходимо вводить временную поправку, определяемую с помощью «прямого» юстировочного теневого режима;
  - Временная поправка должна рассчитываться, как частное толщины образца и среднего значения скорости упругой продольной волны, установленного по дисперсионной кривой при условии ее отклонения не более 0,2 % от среднего значения в такой полосе частот;
  - Отмечено, что в ГОСТе рассчитываются значения скоростей через времена пробега упругих импульсов продольных и сдвиговых волн от излучателя до приемника и не учтены различные положения зерен в пространстве, поэтому применение метода наименьших квадратов (и метода критических углов, который реализован в теньвом иммерсионном методе) в расчётах скоростей более корректно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача разработки и обоснования высокоточного комплексного лазерно-ультразвукового метода определения динамических модулей упругости разномасштабных образцов горных пород, что обеспечит получение объективной информации, необходимой для проектирования горных работ, и вносит вклад в развитие методов горной геофизики.

*Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:*

1. Проведен анализ методов определения модулей упругости образцов горных пород. Установлено, что лазерная ультразвуковая диагностика является прецизионным способом определения скоростей упругих волн, а разработка и использование аналитических законов распространения коротких импульсов продольных и сдвиговых акустических волн с гауссовым поперечным профилем, распространяющихся в образцах горных пород, с последующим восстановлением по ним динамических упругих модулей является актуальной научной задачей.

2. Показано, что при нормальном падении из изотропного твердого тела акустической продольной волны с гауссовым распределением амплитуды давления по поперечному сечению пучка на плоскую границу раздела «твердое тело-образец» и параллельную ей границу раздела «образец-воздух» возникают две сдвиговые волны: первая – в результате трансформации на первой границе, вторая – при отражении продольной волны от границы раздела «образец-воздух». Две данные волны приходят в одну и ту же точку синфазно с одинаковыми амплитудами.

3. Получены аналитические выражения для различных значений лучевого параметра, необходимые для дальнейших расчётов временной формы сигнала для определения скоростей упругих волн. Проведена верификация модельного сигнала, построенного с помощью оптимизационного алгоритма в COMSOL

Multiphysics. Разработан оптимизационный эхо-метод определения скоростей упругих волн.

4. Модернизирована теневая иммерсионная установка Геоскан-02МУ путем автоматизации поворота образца в кювете с помощью установки шагового двигателя и написания программного обеспечения для управления им.

5. Разработан алгоритм определения скоростей упругих волн с помощью теневого метода с использованием автоматизированной установки Геоскан-02МУ.

6. Разработана «Методика определения динамических модулей упругости разномасштабных образцов горных пород с использованием комплексного метода лазерной ультразвуковой диагностики».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО  
ИССЛЕДОВАНИЯ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

**Статьи, опубликованные в журналах из Перечня ВАК РФ и в изданиях, индексируемых Scopus:**

1. Cherepetskaya E.B., Karabutov A.A., Makarov V.A., Mironova E.A., *Shibaev I.A.*, Vysotin N.G., Morozov D. Internal Structure Research of Shungite by Broadband Ultrasonic Spectroscopy // *Key Materials Engineering*, 2017, Vol. 755, PP. 242-247, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.242

2. Kravcov A., Konvalinka A., Vinnikov V.A., Ertuganova E.A., *Shibaev I.A.* and Ivanov P.N. On the Issue of Typical Grain Size Assessment by the Methods of Broadband Laser Opto-Acoustics // *Key Materials Engineering*, 2017, Vol. 755, PP. 212-218, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.212

3. *Shibaev I.A.*, Morozov D.V., Dudchenko O.L., Pavlov I.A. Estimation of local elastic moduli of carbon-containing materials by laser ultrasound // *Key Materials Engineering*, 2018, Vol. 769, PP. 96-101, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.769.96

4. *Shibaev I.A.*, Cherepetskaya E.B., Bychkov A.S., Zarubin V.P., Ivanov P.N. Evaluation of the internal structure of dolerite specimens using X-ray and laser ultrasonic tomography // *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2018, Vol. 9, Issue 9, PP. 84-92

5. *Шибает И.А.*, Винников В.А., Степанов Г.Д. Определение упругих свойств осадочных горных пород на примере образцов известняка с помощью лазерной ультразвуковой диагностики // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)* – М.: Издательство «Горная книга». – №7 – 2020 – С. 125–134, DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134

6. *Шибает И.А.*, Бычков А.С. Обоснование генерации сдвиговой упругой волны с помощью лазерного ультразвука в режиме эхо-импульсов в геоматериале // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)* – М.: Издательство «Горная книга». – № 4-1 – 2021 – С. 108–117, DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_108

7. *Шибает И.А.*, Белов О.Д., Сас И.Е. Определение динамических и статических модулей упругости образцов гранитов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – М.: Издательство «Горная книга». – № 4-1 – 2021 – С. 5–15, DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_5

8. *Шибает И.А.* Определение динамических модулей упругости образцов горных пород при использовании различных методов лазерной ультразвуковой диагностики // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – М.: Издательство «Горная книга». – № 4-1 – 2021 – С. 138–147, DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_138

**Статьи, опубликованные в научных журналах, индексируемых в РИНЦ:**

1. Эртуганова Э.А., Винников В.А., *Шибает И.А.*, Павлов И.А. Изучение структурных особенностей горных пород по оценке спектральных характеристик широкополосных ультразвуковых сигналов, прошедших через образец геоматериала // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – М.: Издательство «Горная книга» – № 2 – 2017 – С. 384-391.

**Патент:**

Карабутов А.А., Черепецкая Е.Б., Бычков А.С., Миронова Е.А., Морозов Н.А., Иванов П.Н., *Шибает И.А.*, Сас И.Е., Зарубин В.П. Изобретение «Способ импульсно-периодического лазерно-ультразвукового контроля твердых материалов и устройство для его осуществления» // Патент RU 2653123 С1 от 07.05.2018.

**Свидетельство о регистрации программы ЭВМ:**

*Шибает И.А.*, Бычков А.С. Программа микроконтроллера для управления шаговым двигателем поворотной оси УНУ Геоскан-02МУ // Свидетельство о регистрации программы ЭВМ № 2020663599 от 29.10.2020 г.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ржевский В.В. Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
2. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород. – М.: Недра, 1975. – 271 с.
3. Зерцалов М.Г. Механика грунтов (введение в механику скальных грунтов). – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 364 с.
4. Кузнецов Г.Н., Ардашев К.А., Кузнецов Г.Н., Филатов Н.А. Методы и средства решения задач горной геомеханики. – М.: Недра, 1987. – 248 с.
5. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. – М.: Недра, 1992. – 224 с.
6. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. – М.: Недра, 1979. – 301 с.
7. Ставрогин, А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. – СПб.: Наука, 2001. – 343 с.
8. Kulatilake H., Stephansson O. Effect of finite size joints on the deformability of jointed rock at the two dimensional level // *Can Geo tech* – 1994. Vol. 31, P.364–374.
9. Lama, R.D., Vutukuri V.S. Handbook on mechanical properties of rocks: Testing techniques and results, Volume II. – Trans tech publications, 1974. – 481 p.
10. Lama R.D., Vutukuri V.S. Handbook on mechanical properties of rocks: Testing techniques and results, Volume III. – Trans tech publications, 1974. – 406 p.
11. Lama R.D., Vutukuri V.S. Handbook on mechanical properties of rocks, Volume IV. – Trans tech publications, 1974. – 515 p.
12. Elmo Davide, Stead Doug. An integrated numerical modelling–discrete fracture network approach applied to the characterisation of rock mass strength of naturally fractured pillars // *Rock Mechanics and Rock Engineering* – 2010. Vol. 43, No 3. P. 3-19. DOI: 10.1007/s00603-009-0027-3.
13. Esmaili Kamran, Hadjigeorgiou John, Grenon Martin. Estimating geometrical and mechanical REV based on synthetic rock mass models at Brunswick Mine // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* – 2010. Vol. 47, No 6. P. 915-926. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.05.010.
14. JianPing Yang, WeiZhong Chen, DianSen Yang, JingQiang Yuan. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling // *Computers and Geotechnics* – 2015. Vol. 64, P. 20-31. DOI 10.1016/j.compgeo.2014.10.011.
15. Min Ki-Bok, Jing Lanru. Numerical determination of the equivalent elastic compliance tensor for fractured rock masses using the distinct element method

- // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2003. Vol. 40, P. 795-816. DOI:10.1016/S1365-1609(03)00038-8.
16. Wang Peitao, Yang Tianhong, Xu Tao, Meifeng Cai, Changhong Li. Numerical analysis on scale effect of elasticity, strength and failure patterns of jointed rock masses // Geosciences Journal – 2016. Vol. 20, No 4. P. 539-549. DOI: 10.1007/s12303-015-0070-x.
  17. Yang Xuxu, Kulatilake P.H.S.W., Jing Hongwen, Yang Shengqi. Numerical simulation of a jointed rock block mechanical behavior adjacent to an underground excavation and comparison with physical model test results // Tunneling and Underground Space Technology – 2015. Vol. 50, P. 129-142. DOI:10.1016/j.tust.2015.07.006.
  18. Zhang Y., Stead D., Elmo D. Characterization of strength and damage of hard rock pillars using a synthetic rock mass method // Computers and Geotechnics – 2015. Vol. 65, P.56-72. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.12.002.
  19. Карташов Ю.М. Инструкция по отбору проб горных пород. Ленинград: ВНИМИ, 1965 – 18 с.
  20. Маршалл Н., Мор Ф. Руководство по геомеханическому документированию кернa. – SRK Consulting Engineers and Scientists, 2009. – 46 с.
  21. Научное пособие. Plaxis CE V20. ООО «НИИ-Информатика». Интернет-ресурс. URL: [https://www.plaxis.ru/support/manual\\_supplement/](https://www.plaxis.ru/support/manual_supplement/), дата обращения 17.07.2021.
  22. Пособие по расчётам. Midas GTS NX. Интернет-ресурс. URL: <http://ru.midasuser.com/web/page.php?no=65>, дата обращения 17.07.2021
  23. Руководство пользователя. Fidesys. Интернет-ресурс. URL: <https://cae-fidesys.com/documentation/>, дата обращения 17.07.2021
  24. Guide Ansys. Интернет-ресурс. URL: <https://www.ansys.com/>, дата обращения 17.07.2021.
  25. Hoek E., Diederichs M. Empirical estimates of rock mass modulus // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences – 2006. – Vol. 43, P.203–215. DOI:10.1016/j.ijrmms.2005.06.005.
  26. Marinos V., Marinos P., Hoek E. The geological strength index: applications and limitations // Bulletin of Engineering Geology and the Environment – 2005. – Vol. 64, P.55-65. DOI 10.1007/s10064-004-0270-5.
  27. Пособие по моделям материалов. Plaxis CE V20. Интернет-ресурс. URL: [https://www.plaxis.ru/support/manual\\_supplement/](https://www.plaxis.ru/support/manual_supplement/), дата обращения 17.07.2021.
  28. DIN EN 14580-2005 Natural stone test methods. Determination of static elastic modulus; German version EN 14580, 2005. – 15 p.
  29. ASTM D 3148 - 02 Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression, 2005. – 6 p.
  30. ГОСТ 28985-91 Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 11 с.

31. ASTM D 2938-95 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens, 2002. – 3 p.
32. Инструкция по эксплуатации Rock Schmidt. Proceq SA. 2016
33. Adnan Aydin. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences – 2008. – p. 1-8. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.01.020.
34. ASTM D 5873 Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method, 2014. – 6 p.
35. Головин Ю. И. Наноиндентирование и его возможности. – М.: Машиностроение. 2009. – 312 с.
36. С.Д. Викторов, А.И. Тюрин, А.Н. Кочанов, А.В. Шуклинов, Т.С. Пирожкова, И.А. Шуварин, Исследование твердости и вязкости разрушения отдельных фаз и межфазных границ горных пород методами микро- и наноиндентирования, Горный информационно-аналитический бюллетень, 2016, № 12, с.124–133
37. V. Kalyan, C.S.N. Murthy, R.P. Choudhary. Int. J. Res. Eng. Appl. Sci. 5, 8, 33 (2015)
38. С.Д. Викторов, Ю.И. Головин, А.Н. Кочанов, А.И. Тюрин, И.А. Шуварин, Т.С. Пирожкова. Физ.-тех. Проблемы разработки полезных ископаемых 4, 46 (2014)
39. M. Bagheripoor, R. Klassen. Rev. Adv. Mater. Sci. 56, 21 (2018)
40. J.C. M'unera, D. Goswami, R.V. Martinez, E.A. Ossa. Mechan. Mater. 148, 103443 (2020).
41. J. Kappacher, A. Leitner, D. Kiener, H. Clemens, V. Maier-Kiener. Mater. Des. 189, 108499 (2020)
42. Ю.И. Головин, Наноиндентирование и механические свойства материалов в субмикро- и наномасштабе. Недавние результаты и достижения, Физика твердого тела, 2021, том 63, вып. 1, 07,12
43. Abousleiman Y., Tran M., Hoang S., Ortega J.A., Ulm F.-J. Geomechanics field characterization of Woodford Shale and Barnett Shale with advanced logging tools and nanoindentation on drill cuttings // Lead Edge – 2010. – Vol. 29, No. 6. P.730–736. DOI: 10.1190/1.3447787.
44. Mason J., Jordan T., Carloni J., Baker S., Zehnder A. Dependence of micro-mechanical properties on lithofacies: indentation experiments on Marcellus Shale // Unconventional resources technology conference, Denver, Colorado, Society of Exploration Geophysicists, American Association of Petroleum. (25–27 August 2014). – P. 1758–1770.
45. Hausild P., Materna A., Kocmanova' L., Matej'c'ek J. Determination of the individual phase properties from the measured grid indentation data // Journal of Materials Research – 2016. – Vol. 31, No. 22. P.3538–3548. DOI: 10.1557/jmr.2016.375.
46. Hausild P., Materna A., Kocmanova L., Matej'c'ek J. Some issues in relations between microstructure and indentation measurements // Solid state

- phenomena – 2016. – Vol. 258, P. 131-136. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.258.131.
47. Du H., Radonjic M. Comparison of micro/nano-indentation results for Pottsville and Marcellus Shale // 52nd US rock mechanics/geomechanics symposium, American Rock Mechanics Association, Seattle, Washington, (17 June 2018).
  48. Li X., Liu Z., Cui S., Luo C., Li C., Zhuang Z. Predicting the effective mechanical property of heterogeneous materials by image based modeling and deep learning // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering – 2019. – Vol. 347, P. 735-753. DOI:10.1016/j.cma.2019.01.005.
  49. Veytskin Y.B., Tammina V.K., Bobko C.P., Hartley P.G., Clennell M.B., Dewhurst D.N., Dagastine R.R. Micromechanical characterization of shales through nanoindentation and energy dispersive x-ray spectrometry // Geomechanics for Energy and the Environment – 2017. – Vol. 9, P. 21-35. DOI: 10.1016/j.gete.2016.10.004.
  50. Yang H., Luo S., Zhang G., Song J. Elasticity of clay shale characterized by nanoindentation. // 51st U.S. rock mechanics/geomechanics symposium, American Rock Mechanics Association, San Francisco, California, USA, (25 June 2017). P. 7.
  51. Vialle S., Lebedev M. Heterogeneities in the elastic properties of microporous carbonate rocks at the microscale from nanoindentation tests // Society of Exploration Geophysicists 85th Annual Meeting, SEG technical program expanded abstracts 2015. P. 3279–3284.
  52. Tankiewicz M. Application of the nanoindentation technique for the characterization of varved clay // Open Geosci – 2018. – Vol. 10, No. 1. P.902–910. DOI:10.1515/geo-2018-0071.
  53. E. Garboczi and A. Day, An Algorithm for Computing the Effective Linear Elastic Properties of Heterogeneous Materials: Three-Dimensional Results for Composites with Equal Phase Poisson Ratios, Vol. 43, No. 9, 1995, pp. 1349-1362.
  54. Garboczi, E. J, Finite Element and Finite Difference Programs for Computing the Linear Elastic and Elastic Properties of Digital Images of Random Materials, NIST Internal Report 6269, 1998
  55. Garboczi, E. J., Douglas, J. F., Bohn, R. B. A hybrid finite element-analytical method for determining the intrinsic elastic moduli of particles having moderately extended shapes and a wide range of elastic properties. *Mechanics of Materials*. 38, 786-800, 2006
  56. Garboczi, E. J., Douglas, J. F., Elastic Moduli of Composites Containing a Low Concentration of Complex-Shaped Particles Having a General Property Contrast with the Matrix, *Mechanics of Materials*, 5, 53-65, 2012
  57. Grader A., Kalam M.Z., Toelke J., Mu Y. A Comparative Study of Digital Rock Physics and Laboratory SCAL Evaluation of Carbonate Cores // International Symposium of the Society of Core Analysis, Hlifax, Canada, (4–7 October 2010). P. 12.

58. Knackstedt, M.A., Latham S., Madadi M., Sheppar A., Varslot, T., Arns C. Digital Rock Physics: 3D Imaging of Core Material and Correlations to Acoustic and Flow Properties // *The Leading Edge* – 2009. – Vol. 28, Issue 1. P. 28–33. DOI:10.1190/1.3064143.
59. Madadi M., Jones A.C., Arns C.H., Knackstedt M.A. 3D Imaging and Simulation of Elastic Properties of Porous Materials // *Computing in Science and Engineering* – 2009. – Vol. 11. Issue 4. P. 65–73. DOI:10.1109/MCSE.2009.110.
60. Zhang T., Hurley N.F., Zhao W. Numerical Modeling of Heterogeneous Carbonates and Multi-Scale Dynamics // *SPWLA 50th Annual Logging Symposium*, The Woodlands, Texas, (21–24 June 2009).
61. Yang Zhang and M. Nafi Toksöz, Estimate the Effective Elastic Properties of Digitized Porous Rocks by Inverting the Cracks Unresolved
62. ГОСТ 21153.7-75 Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 8 с.
63. Rajaoalison H., Knez D., Rajaoalison H., Zlotkowski A. Changes of dynamic mechanical properties of brine-saturated Istebna sandstone under action of temperature and stress // *Przemysl Chemiczny* – 2019. – Vol. 98, № 5. P. 801-804. DOI: 10.15199/62.2019.5.22.
64. Ranjbar-Karami R., Kadkhodaie-ilkhchi A., Shiri M. A modified fuzzy inference system for estimation of the static rock elastic properties: A case study from the Kangan and Dalan gas reservoirs, South Pars gas field, the Persian Gulf // *Journal of Natural Gas Science and Engineering* – 2014. – Vol. 21., P. 962-976. DOI:10.1016/j.jngse.2014.10.034.
65. A. Voleišis, R. Kažys, B. Voleišienė, R. Šliteris, Simultaneous generation of longitudinal and shear ultrasonic waves: knowledge summary, PZT piezoelements manufacturing and experiments, *Ultragarsas (Ultrasound)*, Vol. 66, No. 1, 2011
66. Franco E. E., Andrade M. A. B., Higuti R. T., Adamowski J. C. And Buiochi F. Acoustic transmission with mode conversion phenomenon. In *Proceedings of the 18th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2005*. ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas.
67. Shkuratnik V. L. *Mining Geophysics. Ultrasound Methods*. Moscow: Moscow Mining Institute, 1990. – 103 P.
68. Guo Meng-Qiu, Fu Li-Yun, Ba Jing Comparison of stress-associated coda attenuation and intrinsic attenuation from ultrasonic measurements // *Geophysical Journal International* – 2009. – Vol. 178, Issue 1. P. 447-456. DOI:10.1111/j.1365-246X.2009.04159.x.
69. I. E. Kalashnikov, N. B. Podymova, A. A. Karabutov, L. K. Bolotova, L. I. Kobeleva and A. G. Kolmakov, "Local elastic moduli of particle-filled B83 babbitt-based composite materials prepared by powder metallurgy techniques," *Inorganic Materials*, vol. 52, no. 4, pp. 429-434, 2016, doi: 10.1134/S0020168516040063.

70. Раджаоалисон Х., Злотковский А., Рамболаманана Г. Определение механических свойств песчаника неразрушающим методом // Записки горного института – 2020. – Том 241., С 113-117. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.113.
71. Rao M.V.M.S., Prasanna Lakshmi K.J. Shear wave propagation in rocks and other lossy media: An experimental study // Current Science – 2003. – Vol. 85, No. 8. P. 1221-1225.
72. Muller, T.M. & Shapiro, S.A. Most probable seismic pulses in single realizations of 2-d and 3-d random media // Geophysical Journal International –2001. –Vol. 144, Issue 1. P.83-95. DOI: 10.1046/j.1365-246x.2001.00320.x.
73. Stanke F.E., Kino G.S. A unified theory for elastic wave propagation in polycrystalline materials // The Journal of the Acoustical Society of America – 1984. – Vol. 75, Issue 3. DOI: 10.1121/1.390577.
74. Batzle M. L., Han De-Hua, Hofmann R. Fluid mobility and frequency-dependent seismic velocity—Direct measurements // Geophysics –2006. – Vol. 71, Issue 1. P. 12JF-Z15. DOI: 10.1190/1.2159053.
75. Pimienta L., Fortin J., Guéguen Y. Bulk modulus dispersion and attenuation in sandstones // Geophysics – 2015. – Vol. 80, Issue 2. P. 1MA-Z50. DOI:10.1190/geo2014-0335.1.
76. J. V. M. Borgomano, L. Pimienta, J. Fortin, Y. Guéguen, Dispersion and attenuation measurements of the elastic moduli of a dual-porosity limestone, JGR Solid Earth, 07 April 2017, doi.org/10.1002/2016JB013816
77. Eissa E.A., Kazi A. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts – 1988. – Vol. 25, Issue 6. P. 479-482. DOI: 10.1016/0148-9062(88)90987-4.
78. Brotons V., Tomas R., Ivorra S., Grediaga A., Martinez-Martinez J., Benavente D., Gomez-Heras M. Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks // Materials and Structures – 2016. – Vol. 49, P. 3021-3037. DOI: 10.1617/s11527-015-0702-7.
79. Brotons V., Tomas R., Ivorra S., Grediaga A. Relationship between static and dynamic elastic modulus of a calcarenite heated at different temperatures: the San Julian's stone – 2014. – Vol. 73, P. 791-799. DOI:10.1007/s10064-014-0583-y.
80. Ciccotti M., Mulargia F. Differences between static and dynamic elastic moduli of a typical seismogenic rock –2004. – Vol. 157, Issue 1. P. 474-477. DOI:10.1111/j.1365-246X.2004.02213.x.
81. Фролова Ю.В., Патрушева Н.А. Сравнительный анализ статического и динамического модулей упругости гранитов и гнейсов Алданского щита // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи, серия 18, РУДН Москва. – М., 2016. – С. 100-105.
82. Бельтюков Н.Л., Евсеев А.В., Сопоставление упругих свойств горных пород // Вестник пермского Государственного технического университета – 2010. – Том 9, №5. – С. 82-85.

83. Martinez-Martinez J., Benavente D., Garcia-del-Cura M.A. Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* – 2012. – Vol.71, Issue 2. P.263–268. DOI:10.1007/s10064-011-0399-y.
84. Najibi A.R., Ghafoori M., Lashkaripour G.R., Mohammad R.A. Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran // *Journal of Petroleum Science and Engineering* – 2015. – Vol. 126, P. 78-82. DOI: 10.1016/j.petrol.2014.12.010.
85. Rodríguez-Sastre M.A., Calleja L. The determination of elastic modulus of slates from ultrasonic velocity measurements // In: *Proceedings of the 10th congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG)*. The Geological Society of London, (2006). Paper No. 775.
86. Wang F., Bian H., Yu J., Zhang Y. Correlation of dynamic and static parameters of rock // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* –2016. – Vol. 21, Issue 4. P. 1551-1560.
87. Vanorio T., Prasad M., Patella D., Nur A. Ultrasonic velocity measurements in volcanic rocks: correlation with microtexture // *Geophysical Journal International* – 2002. – Vol. 149, Issue 1. P. 22-36. DOI: 10.1046/j.0956-540x.2001.01580.x.
88. Franco E.E., Meza J. M., Buiochi F. Measurement of elastic properties of materials by the ultrasonic through-transmission technique // *Dyna. Universidad Nacional de Colombia* – 2011. – Vol. 78, No. 168. P.58-64.
89. Franco E.E., Andrade M.A.B., Higuti R.T., Adamowski J.C. Buiochi F. Acoustic transmission with mode conversion phenomenon // *Symposium Series in Mechatronics* – 2006. – Vol. 2. P.113-120.
90. Wu K.-T., Jen C.-K., Kobayashi M., Blouin A. Integrated Piezoelectric Ultrasonic Receivers for Laser Ultrasound in Non-destructive Testing of Metals // *J Nondestruct Eval* – 2011. – Vol. 30. P.1–8. DOI 10.1007/s10921-010-0084-2.
91. Suits L.D., Sheahan T.C., Han Shin-In, Lee In-Mo Evaluation of Rock Bolt Integrity using Guided Ultrasonic Waves // *Geotechnical Testing Journal* – 2009. – Vol. 32, No. 1. DOI:10.1520/GTJ101311.
92. Beard M.D., Lowe M.J.S. Non-destructive testing of rock bolts using guided ultrasonic waves // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* – 2003. – Vol. 40, Issue 4. P. 527-536. DOI: 10.1016/S1365-1609(03)00027-3.
93. Wei Wei, Li Li, Shi Wan-fa, Liu Jia-peng Ultrasonic imaging recognition of coal-rock interface based on the improved variational mode decomposition // *Measurement* – 2021. – Vol. 170. DOI:10.1016/j.measurement.2020.108728.
94. Shikhov A.I., Dunayeva E.N. Ultrasound methods and means for examination of physical and mechanical properties of rocks // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* – 2018. – Vol. 194, Issue 6. DOI:10.1088/1755-1315/194/6/062030.

95. Mast T.D., Subramanian S. Analytic and numerical modeling of ultrasonic B-scan and echo decorrelation imaging // *The Journal of the Acoustical Society of America* –2010. – Vol. 127, Issue 3. P. 1-14. DOI.org/10.1121/1.3384233.
96. Ilett C., Somekh, M. G., and Briggs, G. A. D. 1984, Acoustic microscopy of elastic discontinuities. *Proc. R. Soc. Lond.*, A393, 171-183
97. Briggs, G. A. D., 1985, An introduction to scanning acoustic microscopy: *Royal Microscopical Society Handbook*, 12, Oxford University Press, Oxford
98. Prasad, M., Manghnani, M. H., 1996, Velocity and impedance microstructural anisotropy in reservoir rocks: SEG 66th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1854-1857
99. Prasad, M., Manghnani, M. H., 1997, Effects of pore and differential pressures on compressional wave velocity and quality factor on Berea and Michigan sandstones: *Geophysics*, In press
100. Spence J.C.H. *High-Resolution Electron Microscopy*. Oxford Scholarship, 2013. pp. 300-302.
101. Balk L.J. *Scanning acoustic microscopy // Surface and interface Analysis* – 1986. – Vol. 9, Issue 1. P.47-57. DOI: 10.1002/sia.740090109.
102. Maev R.G. *Acoustical Imaging*. Springer US, 2002. Vol. 26, pp. 493-501. DOI : 10.1007/978-1-4419-8606-1.
103. Prasad M., Reinstaedtler M., Nur A., Walter A. *Quantitative Acoustic Microscopy // Application to Petrophysical Studies of Reservoir Rocks* – 2002. – Vol. 26. P. 493-502. DOI: 10.1007/978-1-4419-8606-1\_62.
104. Prasad M. Mapping impedance micro-structures in rocks with acoustic microscopy // *The Leading Edge* – 2001. – Vol. 20, Issue 2. P.172-179. DOI: 10.1190/1.1438902.
105. Маев Р. Г. *Акустическая микроскопия*. – М.: Торус-Пресс, 2005. – 384 с.
106. Петронюк Ю. С., Мороков Е. С., Левин В. М. Методы импульсной акустической микроскопии в промышленной диагностике // *Известия РАН. Серия физическая*. –2015. – Т. 79, № 10. С. 1425–1431.
107. Ma Z., Zhang W., Du P., Zhu X., Krishnaswamy S., Lin L., Lei M. Nondestructive measurement of elastic modulus for thermally sprayed WC-Ni coatings based on acoustic wave mode conversion by small angle incidence // *NDT & E International* – 2018. – Vol. 94, P.38-46. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.11.003.
108. Dong F., Wang X., Yang Q., Yin A., Xu X. Directional dependence of aluminum grain size measurement by laser-ultrasonic technique // *Materials Characterization* –2017. – vol. 129, P. 114-120. DOI: j.matchar.2017.04.027.
109. Faria J.C.D., Garnier P., Devos A. Non-destructive spatial characterization of buried interfaces in multilayer stacks via two color picosecond acoustics // *Applied Physics Letters* – 2017. – Vol. 111, Issue 24. DOI: 10.1063/1.5007802.
110. Nagakubo A., Lee H. T., Ogi H., Moriyama T., Ono T. Elastic constants of beta tungsten thin films studied by picosecond ultrasonics and density

- functional theory // Applied Physics Letters – 2020. – Vol. 116, Issue 2. DOI: 10.1063/1.5131768.
111. Pyzik P., Ziaja-Sujdak A., Spytek J., O'Donnell M., Pelivanov I., Ambrozinski L., Detection of disbonds in adhesively bonded aluminum plates using laser-generated shear acoustic waves, Photoacoustics, 2021, 21, 100226, DOI 10.1016/j.pacs.2020.100226
112. Gusev V.E., Karabutov A.A. Laser Optoacoustics. – American Institute of Physics New York : AIP Press, 1993. – 296 P.
113. Shibaev I.A., Morozov D.V., Dudchenko O.L., Pavlov I.A. Estimation of Local Elastic Moduli of Carbon-Containing Materials by Laser Ultrasound // Key Engineering Materials – 2018. – Vol. 769. P. 96-101. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.769.96.
114. Черепецкая Е.Б. Разработка лазерного ультразвукового метода диагностики структуры и свойств горных пород на образцах: дис. доктор технических наук: 25.00.16 / Черепецкая Елена Борисовна, – М., 2005. – 266 с.
115. Cherepetskaya E.B., Karabutov A.A., Makarov V.A., Mironova E.A., Shibaev I.A., Vysotin N.G., Morozov D. Internal Structure Research of Shungite by Broadband Ultrasonic Spectroscopy // Key Materials Engineering, 2017, Vol. 755, PP. 242-247, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.242
116. Kravcov A., Konvalinka A., Vinnikov V.A., Ertuganova E.A., Shibaev I.A. and Ivanov P.N. On the Issue of Typical Grain Size Assessment by the Methods of Broadband Laser Opto-Acoustics // Key Materials Engineering, 2017, Vol. 755, PP. 212-218, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.212
117. Белов М. А. Обоснование и разработка метода определения параметров зернистой структуры и пористости горных пород на основе принципов ультразвуковой спектроскопии: дис. кандидат технических наук: 25.00.20 / Белов Михаил Алексеевич, – М., 2005. – 150 с.
118. Закиров А.А. Разработка лазерного ультразвукового метода оценки изменений структуры горных пород под влиянием выветривания: дис. кандидат технических наук: 25.00.16 / Закиров Ансар Анварович, – М., 2010. – 174 с.
119. Shibaev I.A., Cherepetskaya E.B., Bychkov A.S., Zarubin V.P., Ivanov P.N. Evaluation of the internal structure of dolerite specimens using X-ray and laser ultrasonic tomography // International Journal of Civil Engineering and Technology, 2018, Vol. 9, Issue 9, PP. 84-92
120. Приложение к свидетельству № 58219 об утверждении типа средств измерений «ОПИСАНИЕ ТИПА СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ», 5 л, 2015 г., Лазерный ультразвуковой дефектоскоп УДЛ-2М, № в госреестре 60172-15.
121. Aki K., Richards P. G Quantitative Seismology. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1980. – 932 P.
122. V. E. Gusev and A. A. Karabutov, Laser Optoacoustics, New York : AIP Press, 1993.

123. Wen J. J., Breazeale M. A. A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams // *The Journal of the Acoustical Society of America* –1998. – Vol. 83, no. 5. P. 1752-1756. DOI: 10.1121/1.396508.
124. Шибаев И.А., Бычков А.С. Обоснование генерации сдвиговой упругой волны с помощью лазерного ультразвука в режиме эхо-импульсов в геоматериале // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)* – М.: Издательство «Горная книга». – № 4-1 – 2021 – С. 108–117, DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_108
125. И.В. Митин, В.С. Русаков, Анализ и обработка экспериментальных данных, Москва, Физический факультет МГУ, Методические материалы, 2004, 45 страниц.
126. Шибаев И.А., Бычков А.С. Программа микроконтроллера для управления шаговым двигателем поворотной оси УНУ Геоскан-02МУ // Свидетельство о регистрации программы ЭВМ № 2020663599 от 29.10.2020 г.
127. ASTM D2845-08 Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic, Elastic Constants of Rock, 2008. – 7 p.
128. Shibaev I.A., Morozov D.V., Dudchenko O.L., Pavlov I.A. Estimation of local elastic moduli of carbon-containing materials by laser ultrasound // *Key Materials Engineering*, 2018, Vol. 769, PP. 96-101, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.769.96
129. Krishtal M.M., Yasnikov I.S., Polunin V.I., Filatov A.M., Ul'yanenkov A.G. Skaniruyushchaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenospektral'nyy mikroanaliz v primerakh prakticheskogo primeneniya. Pod red. M.M. Krishtala (The scanning electronic microscopy and the X-ray spectral microanalysis in examples of practical application. Krishtal M.M. (Ed.)), Moscow, Tekhnosfera, 2009, 208 p
130. Х. Вильямс, Ф. Дж. Тернер, Ч.М. Гилберт. Петрография.– Издательство иностранной литературы, 1957. – 423 с.
131. ISRM: Rock characterisation testing and monitoring. In: Brown, E.T. (ed.) Pergamon Press, Oxford (1981), 211 pp
132. M. Fener, The Effect of Rock Sample Dimension on the P-Wave Velocity, *J Nondestruct Eval* (2011) 30:99–105, DOI 10.1007/s10921-011-0095-7
133. Шибаев И.А., Винников В.А., Степанов Г.Д. Определение упругих свойств осадочных горных пород на примере образцов известняка с помощью лазерной ультразвуковой диагностики // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)* – М.: Издательство «Горная книга». – №7 – 2020 – С. 125–134, DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134
134. А.А. Карабутов, Н.Б. Подымова, Ю.Г. Соколовская, Локальные соотношения Крамерса-Кронига для коэффициента затухания и фазовой скорости продольных ультразвуковых волн в полимерных композитах, *Акустический Журнал*, 2019, том 65, №2, с. 182-189

135. Zellouf D., Jayet X, Saint Pierre N., Tatibouet J., Baboux J.C., Ultrasonic spectroscopy in polymeric materials. Application of the Kramers—Kronig relations // J. Appl.Phys. 1996. V. 80. № 5. P. 2728-2732
136. Trousil R.L., Waters K.R., Miller J. G. Experimental validation of the use of Kramers—Kronig relations to eliminate the phase sheet ambiguity in broadband phase spectroscopy // J. Acoust. Soc. Am. 2001. V. 109. № 5. Pt. 1. P. 2236-2244
137. Waters K.R., Hughes M.S., Mobley J., Brandenburger G.H., Miller J.G. On the applicability of Kramers—Kronig relations for ultrasonic attenuation obeying a frequency power law // J. Acoust. Soc. Am. 2000. V. 108. № 2. P. 556-563
138. Шибаев И.А., Белов О.Д., Сас И.Е. Определение динамических и статических модулей упругости образцов гранитов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – М.: Издательство «Горная книга». – № 4-1 – 2021 – С. 5–15, DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_5
139. Шибаев И.А. Определение динамических модулей упругости образцов горных пород при использовании различных методов лазерной ультразвуковой диагностики // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – М.: Издательство «Горная книга». – № 4-1 – 2021 – С. 138–147, DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_138

ПРИЛОЖЕНИЕ А. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ  
РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ



Рисунок А.1 – Скан свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа микроконтроллера для управления шаговым двигателем поворотной оси УНУ Геоскан-02МУ»

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ОБЩАЯ ТАБЛИЦА СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

Таблица Б1. Общая сводная таблица свойств образцов аргиллита.

Толщина образца (full size), мм	Образец	№ образца пластины	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Ошибка плотности, г/см <sup>3</sup>	Среднее значение толщины пластины, мм	СКО, мм	Коэф. вариации	Оптимизационный эхо-метод				Теневого метод				Оптимизационный эхо-метод			Теневого метод		
								Cl, м/с	Ошибка Cl, м/с	Ct, м/с	Ошибка Ct, м/с	Cl, м/с	Ошибка Cl, м/с	Ct, м/с	Ошибка Ct, м/с	Edyn, ГПа	с. Poisson	Ошибка Edyn, ГПа	Edyn, ГПа	с. Poisson	Ошибка Edyn, ГПа
40,5	Arg 4.1	Arg 4.1.1	2,569	0,026	3,67	0,0285	0,0091	4 830	44	2 889	26	4 855	44	2 865	26	52,4	0,22	0,6	-	-	-
		Arg 4.1.2	2,620	0,026	2,96	0,0228	0,0077	4 845	37	2 849	22	4 899	38	2 822	22	52,6	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.1.3	2,580	0,026	5,71	0,0445	0,0076	4 792	36	2 860	22	4 815	37	2 828	21	51,6	0,22	0,6	-	-	-
		Arg 4.1.4	2,610	0,026	5,85	0,046	0,0079	4 829	38	2 835	22	4 811	38	2 877	23	51,9	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.1.5	2,570	0,026	10,15	0,0598	0,0059	4 850	29	2 867	17	4 903	29	2 915	17	52,0	0,23	0,6	-	-	-
		Arg 4.1.6	2,610	0,026	9,82	0,0438	0,0045	4 866	22	2 854	13	4 873	22	2 930	13	52,6	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.1.7	2,590	0,026	14,98	0,1114	0,0074	4 803	36	2 855	21	4 850	36	2 862	21	51,8	0,23	0,6	-	-	-
		ARG 4.1 FULL SIZE	2,590	0,026	40,5	0,41	0,0101	-				4 857	49	2 845	29	-	-	-	51,9	0,24	0,6
39,4	Arg 4.2	Arg 4.2.1	2,583	0,026	3,16	0,0235	0,0074	4 893	17	2 809	10	-	-	-	-	51,1	0,25	0,5	-	-	-
		Arg 4.2.2	2,587	0,026	2,92	0,0192	0,0061	4 891	33	2 846	19	-	-	-	-	52,1	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.2.3	2,587	0,026	2,96	0,0189	0,0062	4 870	21	2 868	12	-	-	-	-	52,5	0,23	0,5	-	-	-
		Arg 4.2.4	2,587	0,026	3,09	0,0257	0,0084	4 893	53	2 812	30	-	-	-	-	51,3	0,25	0,7	-	-	-
		Arg 4.2.5	2,579	0,026	3,05	0,02	0,0065	4 867	34	2 844	19	-	-	-	-	51,8	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.2.6	2,592	0,026	3,11	0,029	0,0096	4 877	21	2 840	12	-	-	-	-	52,0	0,24	0,5	-	-	-
		Arg 4.2.7	2,584	0,026	2,99	0,0245	0,0082	4 766	28	2 819	16	-	-	-	-	50,6	0,23	0,5	-	-	-
		Arg 4.2.8	2,592	0,026	2,99	0,0302	0,0096	4 881	32	2 874	18	-	-	-	-	52,9	0,23	0,6	-	-	-
		Arg 4.2.9	2,581	0,026	2,93	0,0194	0,0064	4 898	54	2 823	32	-	-	-	-	51,5	0,25	0,7	-	-	-
		Arg 4.2.10	2,591	0,026	3,09	0,0123	0,0042	4 887	47	2 855	28	-	-	-	-	52,4	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.2.11	2,580	0,026	3,04	0,0198	0,0068	4 750	52	2 815	30	-	-	-	-	50,3	0,23	0,6	-	-	-
		Arg 4.2.12	2,581	0,026	3,16	0,0161	0,0054	4 863	39	2 834	22	-	-	-	-	51,5	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.2.13	2,580	0,026	2,93	0,0299	0,0098	4 861	53	2 890	31	-	-	-	-	52,9	0,23	0,7	-	-	-
Arg 4.2.14	2,577	0,026	3,08	0,0154	0,0052	4 891	47	2 867	27	-	-	-	-	52,5	0,24	0,6	-	-	-		
		ARG 4.2 FULL SIZE	2,620	0,026	39,4	0,43	0,0109	-				4 856	53	2 846	31	-	-	-	52,6	0,24	0,7
39,1	Arg 4.3	Arg 4.3.1	2,591	0,026	5,91	0,0431	0,0070	4 842	33	2 802	19	-	-	-	-	50,8	0,25	0,6	-	-	-
		Arg 4.3.2	2,576	0,026	5,85	0,0522	0,0084	4 707	35	2 793	21	-	-	-	-	49,4	0,23	0,6	-	-	-
		Arg 4.3.3	2,592	0,026	6,21	0,0488	0,0080	4 725	33	2 786	19	-	-	-	-	49,6	0,23	0,6	-	-	-
		Arg 4.3.4	2,592	0,026	5,87	0,0422	0,0068	4 845	27	2 833	16	-	-	-	-	51,6	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.3.5	2,593	0,026	6,1	0,0307	0,0051	4 733	39	2 785	23	-	-	-	-	49,7	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.3.6	2,589	0,026	6,01	0,0469	0,0077	4 748	27	2 795	16	-	-	-	-	50,0	0,23	0,5	-	-	-
		Arg 4.3.7	2,585	0,026	5,97	0,0337	0,0055	4 798	30	2 746	17	-	-	-	-	49,0	0,26	0,5	-	-	-
		Arg 4.3.8	2,588	0,026	5,89	0,0416	0,0068	4 866	36	2 753	21	-	-	-	-	49,6	0,26	0,6	-	-	-
		ARG 4.3 FULL SIZE	2,580	0,026	39,1	0,42	0,0107	-				4 686	50	2 810	-	-	-	-	49,7	0,22	0,6
39,6	Arg 4.4	Arg 4.4.1	2,596	0,026	10,16	0,0604	0,0059	4 784	18	2 764	10	-	-	-	-	49,6	0,25	0,5	-	-	-
		Arg 4.4.2	2,596	0,026	9,75	0,0649	0,0065	4 780	30	2 784	17	-	-	-	-	50,0	0,24	0,5	-	-	-
		Arg 4.4.3	2,594	0,026	9,88	0,0532	0,0053	4 817	17	2 741	10	-	-	-	-	49,1	0,26	0,5	-	-	-
		Arg 4.4.4	2,594	0,026	9,78	0,037	0,0037	4 820	24	2 744	14	-	-	-	-	49,2	0,26	0,5	-	-	-
		Arg 4.4.5	2,593	0,026	10,16	0,0422	0,0042	4 832	31	2 755	18	-	-	-	-	49,6	0,26	0,5	-	-	-
				ARG 4.4 FULL SIZE	2,609	0,026	39,6	0,35	0,0088	-				4 720	41	2 765	25	-	-	-	49,4
40,4	Arg 4.5	Arg 4.5.1	2,590	0,026	2,96	0,0234	0,0077	4 706	41	2 852	25	-	-	-	-	51,0	0,21	0,6	-	-	-
		Arg 4.5.2	2,577	0,026	3,18	0,0281	0,0094	4 690	20	2 727	12	-	-	-	-	47,7	0,24	0,5	-	-	-
		Arg 4.5.3	2,577	0,026	3	0,0198	0,0064	4 679	31	2 865	19	-	-	-	-	50,8	0,20	0,6	-	-	-
		Arg 4.5.4	2,594	0,026	3,09	0,0324	0,0105	4 710	41	2 888	25	-	-	-	-	51,9	0,20	0,6	-	-	-
		Arg 4.5.5	2,577	0,026	3,13	0,0195	0,0063	4 695	43	2 910	27	-	-	-	-	51,9	0,19	0,7	-	-	-
		Arg 4.5.6	2,578	0,026	3,16	0,0282	0,0094	4 688	30	2 818	18	-	-	-	-	49,8	0,22	0,6	-	-	-

		Arg 4.5.7	2,589	0,026	3	0,022	0,0070	4 651	17	2 823	11	-	-	-	-	49,9	0,21	0,5	-	-	-
		Arg 4.5.8	2,593	0,026	3,06	0,0254	0,0086	4 661	48	2 889	30	-	-	-	-	51,4	0,19	0,7	-	-	-
		Arg 4.5.9	2,593	0,026	3,15	0,0161	0,0052	4 671	40	2 831	24	-	-	-	-	50,3	0,21	0,6	-	-	-
		Arg 4.5.10	2,595	0,026	3,1	0,0213	0,0070	4 711	53	2 857	32	-	-	-	-	51,2	0,21	0,7	-	-	-
		Arg 4.5.11	2,589	0,026	2,94	0,023	0,0075	4 708	15	2 739	9	-	-	-	-	48,3	0,24	0,5	-	-	-
		Arg 4.5.12	2,582	0,026	3	0,0109	0,0037	4 744	28	2 755	16	-	-	-	-	48,8	0,25	0,5	-	-	-
		Arg 4.5.13	2,577	0,026	3,12	0,0295	0,0100	4 655	51	2 721	30	-	-	-	-	47,3	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.5.14	2,586	0,026	2,99	0,0245	0,0081	4 716	42	2 912	26	-	-	-	-	52,3	0,19	0,7			
		ARG 4.5 FULL SIZE	2,570	0,026	40,4	0,33	0,0082	-				4 695	38	2 846	23	-	-	-	50,4	0,21	0,6
40,7	Arg 4.6	Arg 4.6.1	2,596	0,026	6,13	0,0327	0,0056	4 826	27	2 865	16	-	-	-	-	52,3	0,23	0,6	-	-	-
		Arg 4.6.2	2,581	0,026	6,17	0,0413	0,0069	4 802	33	2 860	20	-	-	-	-	51,7	0,23	0,6	-	-	-
		Arg 4.6.3	2,579	0,026	6,13	0,0509	0,0086	4 856	42	2 822	24	-	-	-	-	51,1	0,25	0,6	-	-	-
		Arg 4.6.4	2,592	0,026	5,88	0,0426	0,0069	4 835	34	2 842	20	-	-	-	-	51,8	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.6.5	2,581	0,026	6,16	0,0372	0,0063	4 866	31	2 842	18	-	-	-	-	51,7	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.6.6	2,583	0,026	5,98	0,0327	0,0054	4 835	26	2 832	15	-	-	-	-	51,3	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.6.7	2,582	0,026	5,86	0,041	0,0071	4 847	34	2 820	20	-	-	-	-	51,1	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.6.8	2,579	0,026	6,19	0,0295	0,0048	4 846	23	2 846	14	-	-	-	-	51,7	0,24	0,5	-	-	-
		ARG 4.6 FULL SIZE	2,610	0,026	40,7	0,43	0,0106	-				4 824	51	2 826	30	-	-	-	51,6	0,24	0,6
39,4	Arg 4.7	Arg 4.7.1	2,589	0,026	10,2	0,0555	0,0057	4 791	24	2 802	14	-	-	-	-	50,4	0,24	0,5	-	-	-
		Arg 4.7.2	2,592	0,026	10,14	0,0396	0,0040	4 817	26	2 791	15	-	-	-	-	50,4	0,25	0,5	-	-	-
		Arg 4.7.3	2,593	0,026	9,89	0,054	0,0053	4 864	17	2 789	9	-	-	-	-	50,6	0,26	0,5	-	-	-
		Arg 4.7.4	2,583	0,026	10,02	0,0523	0,0052	4 826	28	2 795	16	-	-	-	-	50,4	0,25	0,5	-	-	-
		Arg 4.7.5	2,575	0,026	10,15	0,0476	0,0047	4 876	28	2 812	16	-	-	-	-	50,9	0,25	0,6	-	-	-
				ARG 4.7 FULL SIZE	2,590	0,026	39,4	0,31	0,0079	-				4 686	37	2 847	22	-	-	-	50,7
39,8	Arg 4.8	Arg 4.8.1	2,586	0,026	2,99	0,0198	0,0063	4 827	38	2 885	23	-	-	-	-	52,6	0,22	0,6	-	-	-
		Arg 4.8.2	2,589	0,026	3,02	0,0105	0,0035	4 961	39	2 856	22	-	-	-	-	52,9	0,25	0,6	-	-	-
		Arg 4.8.3	2,587	0,026	3,17	0,0273	0,0087	4 918	47	2 815	27	-	-	-	-	51,5	0,26	0,6	-	-	-
		Arg 4.8.4	2,589	0,026	2,92	0,0196	0,0066	4 930	43	2 799	24	-	-	-	-	51,2	0,26	0,6	-	-	-
		Arg 4.8.5	2,589	0,026	2,94	0,0302	0,0100	4 843	29	2 836	17	-	-	-	-	51,6	0,24	0,6	-	-	-
		Arg 4.8.6	2,589	0,026	3,01	0,01	0,0032	4 940	36	2 882	21	-	-	-	-	53,4	0,24	0,6	-	-	-
				ARG 4.8 FULL SIZE	2,590	0,026	39,8	0,37	0,0093	-				4 900	46	2 803	26	-	-	-	51,1
40,3	Arg 4.9	Arg 4.9.1	2,572	0,026	6,21	0,0431	0,0072	4 887	33	2 837	19	-	-	-	-	51,6	0,25	0,6	-	-	-
		Arg 4.9.2	2,573	0,026	6,21	0,03	0,0051	4 911	33	2 834	19	-	-	-	-	51,7	0,25	0,6	-	-	-
		Arg 4.9.3	2,572	0,026	5,94	0,0447	0,0076	4 963	21	2 856	12	-	-	-	-	52,6	0,25	0,5	-	-	-
		Arg 4.9.4	2,575	0,026	6,16	0,0323	0,0053	4 930	28	2 783	16	-	-	-	-	50,5	0,27	0,5	-	-	-
				ARG 4.9 FULL SIZE	2,569	0,026	40,3	0,41	0,0102	-				4 970	50	2 781	29	-	-	-	50,5
39,6	Arg 4.10	Arg 4.10.1	2,592	0,026	10,17	0,0566	0,0056	4 990	19	2 855	11					53,1	0,26	0,6	-	-	-
		Arg 4.10.2	2,591	0,026	9,78	0,0628	0,0062	4 957	30	2 852	17					52,8	0,25	0,6	-	-	-
				ARG 4.10 FULL SIZE	2,590	0,026	39,6	0,33	0,0083	-				4 925	41	2 870	24	-	-	-	53,0

Таблица Б2. Общая сводная таблица свойств образцов гранита Возрождение.

Толщина образца (full size), мм	Образец	№ образца пластины	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Ошибка плотности, г/см <sup>3</sup>	Среднее значение толщины пластины, мм	СКО, мм	Коэф. вариации	Теневой метод				Теневой метод		
								Cl, м/с	Ошибка Cl, м/с	Ct, м/с	Ошибка Ct, м/с	Edyn, ГПа	c. Poisson	Ошибка Edyn, ГПа
30,6	GrV 7.1	GrV 7.1.1	2,656	0,027	5,14	0,0285	0,0091	2 963	55	1 799	7	20,8	0,21	0,4
		GrV 7.1.2	2,650	0,027	8,02	0,0228	0,0077	3 175	54	1 905	8	23,4	0,22	0,4
		GrV 7.1.3	2,639	0,026	9,94	0,0445	0,0076	3 999	52	2 588	32	40,3	0,14	0,7
		GrV 7.1.4	2,656	0,027	11,86	0,046	0,0079	4 889	53	2 750	16	51,0	0,27	0,6
		GrV 7.1.5	2,661	0,027	17,95	0,0598	0,0059	5 245	47	3 042	17	61,4	0,25	0,7
		GrV 7.1 FULL SIZE	2,639	0,026	30,6	0,41	0,0101	5 197	48	2 942	35	57,8	0,26	0,7
30,6	GrV 7.2	GrV 7.2.1	2,665	0,027	9,85	0,0715	0,0073	5 150	37	2 941	21	58,0	0,26	0,7
		GrV 7.2.2	2,665	0,027	9,91	0,0962	0,0097	5 079	49	2 994	29	58,9	0,23	0,7
		GrV 7.2.3	2,664	0,027	10,08	0,065	0,0064	5 181	33	2 974	19	59,1	0,25	0,7
		GrV 7.2.4	2,667	0,027	10,09	0,0894	0,0089	5 191	46	2 953	26	58,6	0,26	0,7
		GrV 7.2.5	2,665	0,027	10,12	0,0756	0,0075	5 176	39	2 989	22	59,5	0,25	0,7
		GrV 7.2 FULL SIZE	2,664	0,027	30,5	0,35	0,0088	5 226	46	2 940	26	58,4	0,27	0,7
30	GrV 7.3	GrV 7.3.1	2,662	0,027	12,01	0,0973	0,0081	5 213	42	2 975	24	59,3	0,26	0,7
		GrV 7.3.2	2,663	0,027	12,3	0,0806	0,0066	5 201	34	2 987	20	59,6	0,25	0,7
		GrV 7.3.3	2,661	0,027	12,33	0,0664	0,0054	5 189	28	2 994	16	59,7	0,25	0,6
		GrV 7.3.4	2,665	0,027	12,27	0,0751	0,0061	5 205	32	2 994	18	59,9	0,25	0,7
		GrV 7.3 FULL SIZE	2,664	0,027	30,7	0,33	0,0082	5 208	43	2 969	24	59,1	0,26	0,7
30,5	GrV 7.4	GrV 7.4.1	2,661	0,027	17,98	0,095	0,0053	5 240	28	3 005	16	60,3	0,25	0,6
		GrV 7.4.2	2,660	0,027	18,08	0,0665	0,0037	5 245	19	2 999	11	60,2	0,26	0,6
		GrV 7.4.3	2,666	0,027	18,23	0,0704	0,0039	5 205	20	3 000	12	60,0	0,25	0,6
		GrV 7.4 FULL SIZE	2,662	0,027	30,8	0,43	0,0106	5 241	55	3 005	32	60,3	0,26	0,8
30,7	GrV 7.5	GrV 7.5.1	2,665	0,027	10,08	0,0777	0,0077	5 172	40	2 970	23	59,0	0,25	0,7
		GrV 7.5.2	2,667	0,027	10	0,0969	0,0097	5 194	50	2 953	29	58,7	0,26	0,7
		GrV 7.5.3	2,664	0,027	9,84	0,0854	0,0087	5 217	45	2 972	26	59,3	0,26	0,7
		GrV 7.5.4	2,663	0,027	10,11	0,0982	0,0097	5 213	51	2 993	29	59,8	0,25	0,7
		GrV 7.5.5	2,665	0,027	9,89	0,079	0,0080	5 171	41	2 998	24	59,7	0,25	0,7
		GrV 7.5 FULL SIZE	2,659	0,027	30,5	0,35	0,0088	5 170	46	2 985	26	59,2	0,25	0,7
30,8	GrV 7.6	GrV 7.6.1	2,653	0,027	12,17	0,0976	0,0080	5 243	42	2 933	24	58,1	0,27	0,7
		GrV 7.6.2	2,654	0,027	12,24	0,0877	0,0072	5 232	37	2 920	21	57,7	0,27	0,7
		GrV 7.6.3	2,655	0,027	12,31	0,0595	0,0048	5 259	25	2 954	14	58,8	0,27	0,6
		GrV 7.6.4	2,653	0,027	12,02	0,0692	0,0058	5 237	30	2 934	17	58,1	0,27	0,6
		GrV 7.6 FULL SIZE	2,654	0,027	30,7	0,33	0,0082	5 254	43	2 923	24	57,9	0,28	0,7
30,4	GrV 7.7	GrV 7.7.1	2,660	0,027	18,03	0,0999	0,0055	5 217	29	3 030	17	60,8	0,25	0,7
		GrV 7.7.2	2,661	0,027	18,22	0,1235	0,0068	5 235	35	3 033	21	61,1	0,25	0,7
		GrV 7.7.3	2,662	0,027	17,9	0,0663	0,0037	5 222	19	3 044	11	61,3	0,24	0,6
		GrV 7.7 FULL SIZE	2,662	0,027	30,8	0,43	0,0106	5 259	56	3 018	32	60,8	0,25	0,8
31,1	GrV 7.8	GrV 7.8.1	2,658	0,027	10,13	0,0778	0,0077	5 182	40	2 945	23	58,2	0,26	0,7
		GrV 7.8.2	2,659	0,027	10,01	0,0879	0,0088	5 188	46	2 965	26	58,8	0,26	0,7
		GrV 7.8.3	2,657	0,027	9,87	0,0842	0,0085	5 210	44	2 999	26	59,8	0,25	0,7
		GrV 7.8.4	2,658	0,027	9,83	0,0593	0,0060	5 222	32	2 945	18	58,4	0,27	0,6
		GrV 7.8.5	2,659	0,027	9,94	0,0910	0,0092	5 193	48	2 999	27	59,8	0,25	0,7
		GrV 7.8 FULL SIZE	2,660	0,027	30,5	0,35	0,0088	5 234	46	2 985	26	59,7	0,26	0,7
30,4	GrV 7.9	GrV 7.9.1	2,659	0,027	12,06	0,0958	0,0079	5 190	41	2 970	24	58,9	0,26	0,7
		GrV 7.9.2	2,659	0,027	12,17	0,0971	0,0080	5 234	42	2 972	24	59,3	0,26	0,7
		GrV 7.9.3	2,658	0,027	12,27	0,0612	0,0050	5 199	26	2 974	15	59,1	0,26	0,6
		GrV 7.9.4	2,659	0,027	12,07	0,0975	0,0081	5 206	42	2 968	24	59,0	0,26	0,7
		GrV 7.9	2,660	0,027	30,7	0,33	0,0082	5 230	43	2 960	24	58,9	0,26	0,7

		FULL SIZE												
30,6	GrV 7.10	GrV 7.10.1	2,660	0,027	18,18	0,0707	0,0039	5 204	20	3 010	12	60,2	0,25	0,6
		GrV 7.10.2	2,661	0,027	18,12	0,0683	0,0038	5 215	20	2 999	11	60,0	0,25	0,6
		GrV 7.10.3	2,662	0,027	18,1	0,0945	0,0052	5 200	27	2 986	16	59,5	0,25	0,6
		GrV 7.10 FULL SIZE	2,639	0,026	30,8	0,43	0,0106	5 230	55	3 012	32	59,9	0,25	0,8

## ПРИЛОЖЕНИЕ В. ВРЕМЕННЫЕ ФОРМЫ СИГНАЛОВ

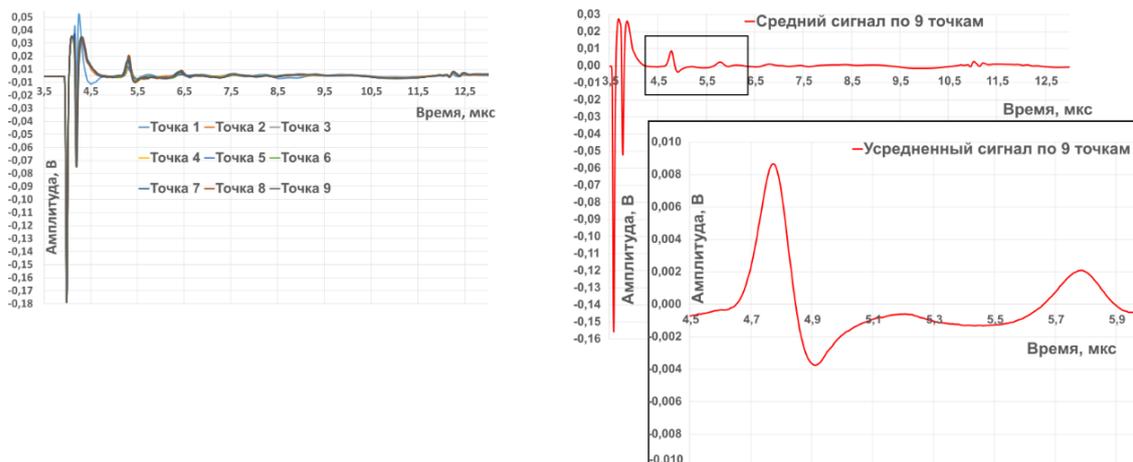


Рисунок В.1 – Временная форма сигнала образца долерита толщиной 3,10 мм, полученная с помощью эхо-режима

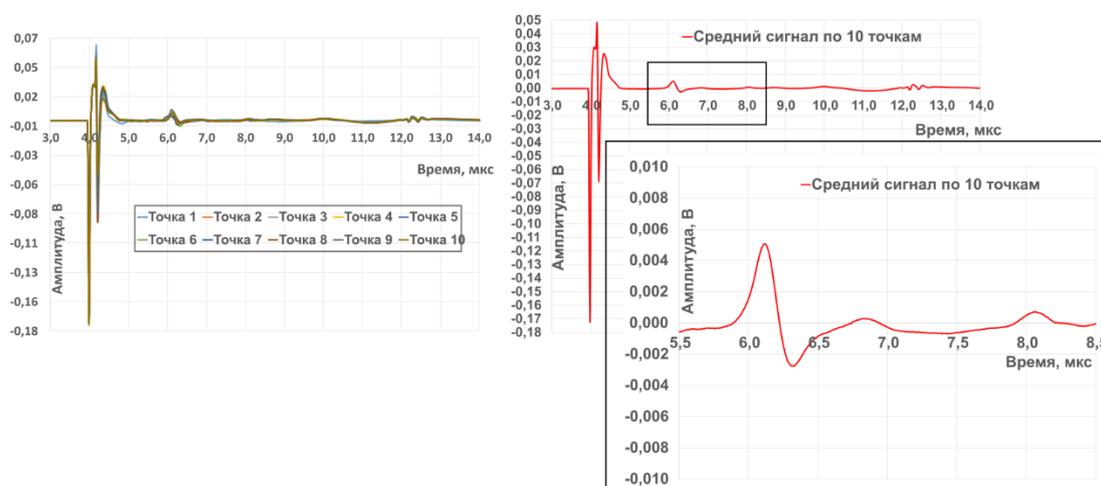


Рисунок В.2 – Временная форма сигнала образца долерита толщиной 5,09 мм, полученная с помощью эхо-режима

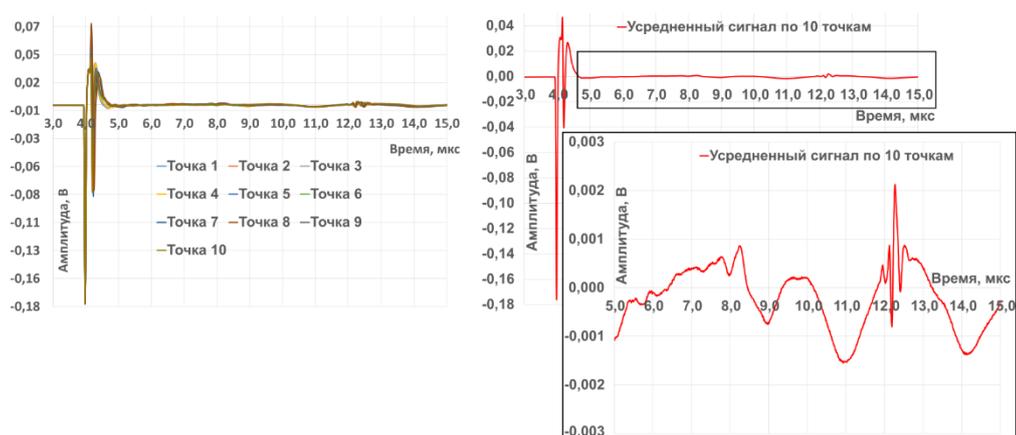


Рисунок В.3 – Временная форма сигнала образца долерита толщиной 9,94 мм, полученная с помощью эхо-режима

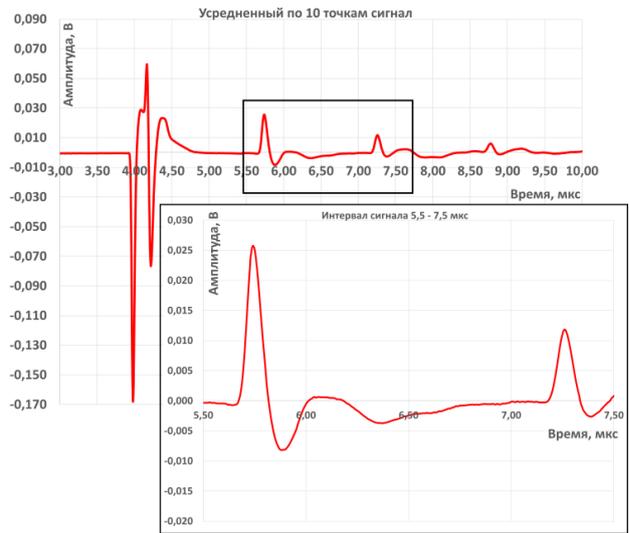
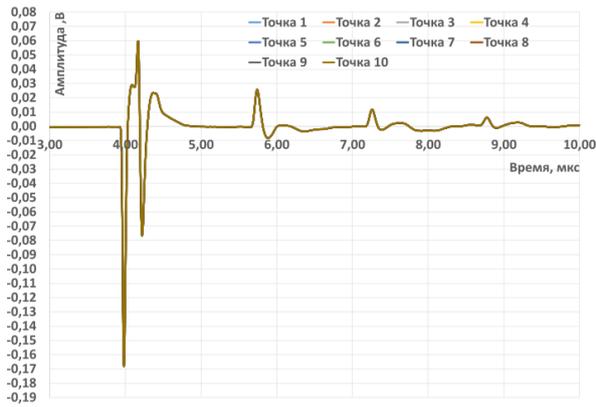


Рисунок В.4 – Временная форма сигнала образца аргиллита толщиной 3,67 мм, полученная с помощью эхо-режима

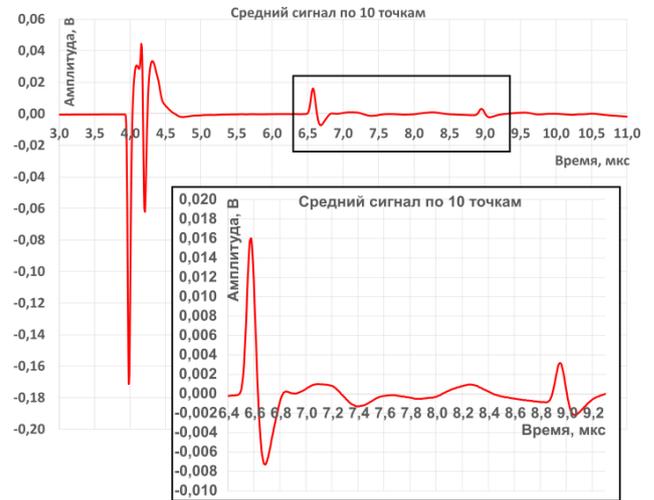
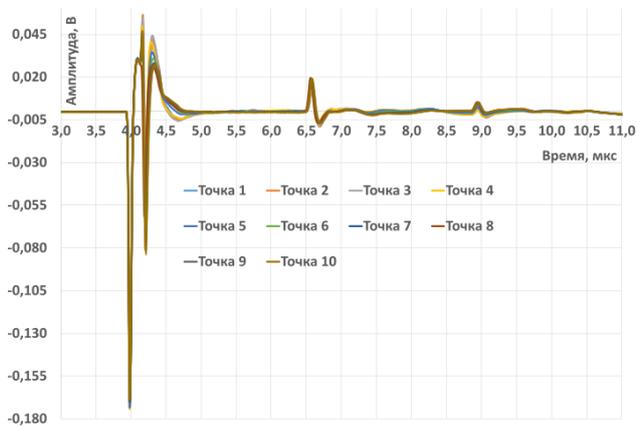


Рисунок В.5 – Временная форма сигнала образца аргиллита толщиной 5,71 мм, полученная с помощью эхо-режима

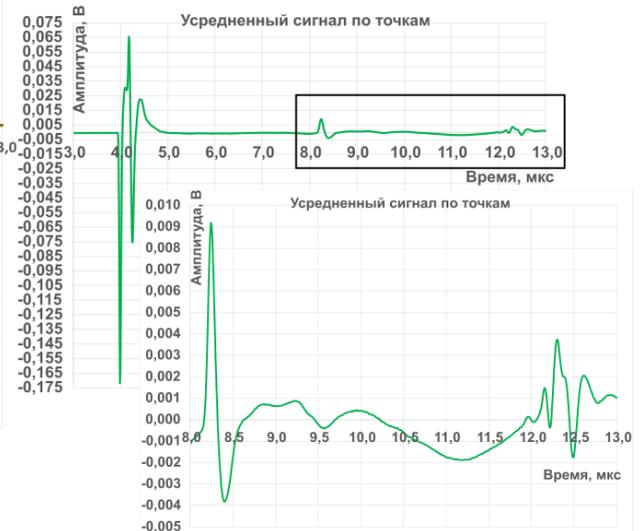
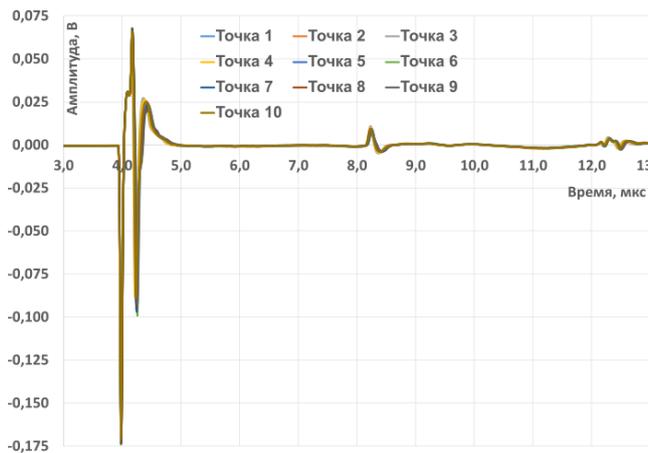


Рисунок В.6 – Временная форма сигнала образца аргиллита толщиной 9,82 мм, полученная с помощью эхо-режима

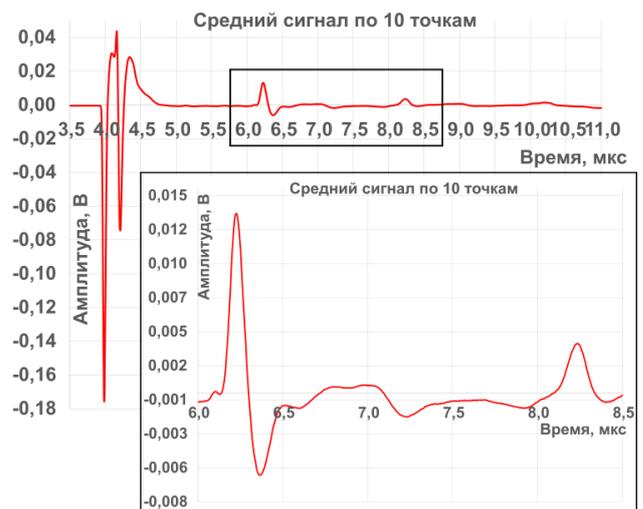
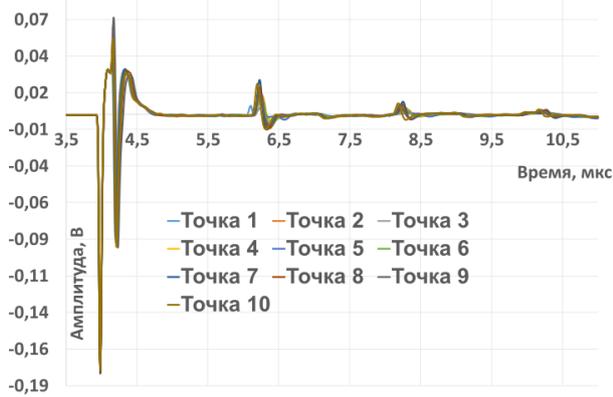


Рисунок В.7 – Временная форма сигнала образца мрамора толщиной 5,82 мм, полученная с помощью эхо-режима

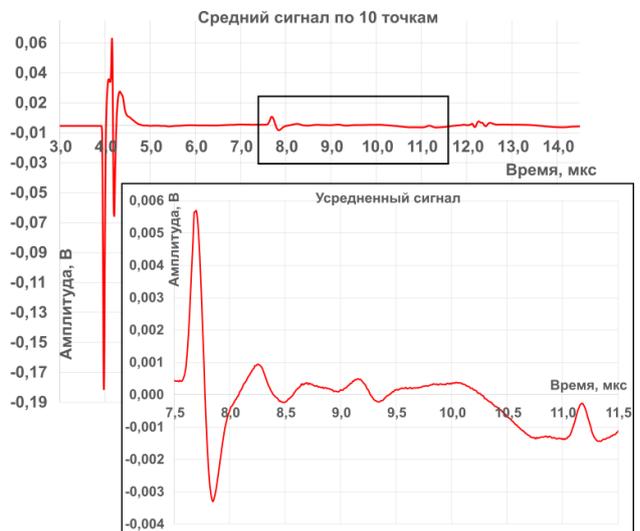
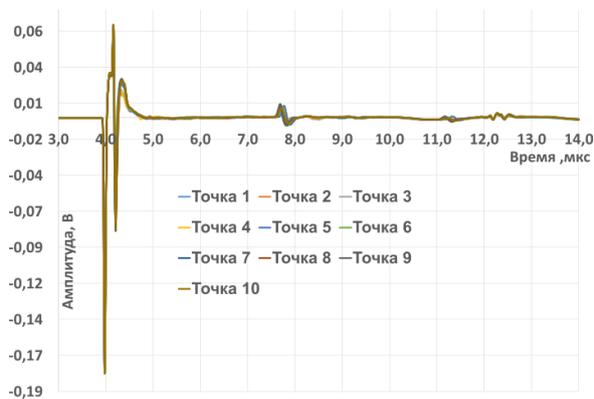


Рисунок В.8 – Временная форма сигнала образца мрамора толщиной 10,07 мм, полученная с помощью эхо-режима

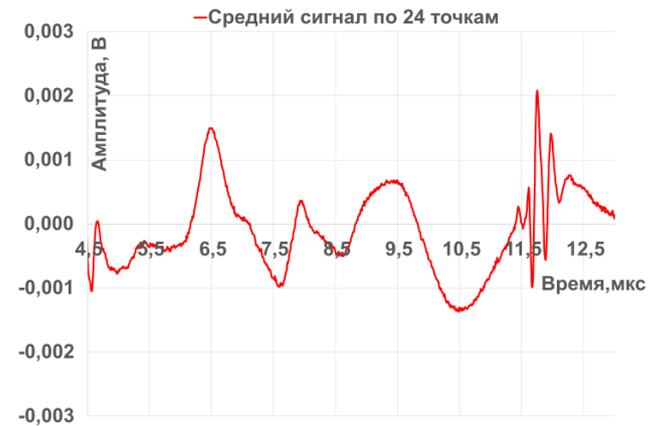
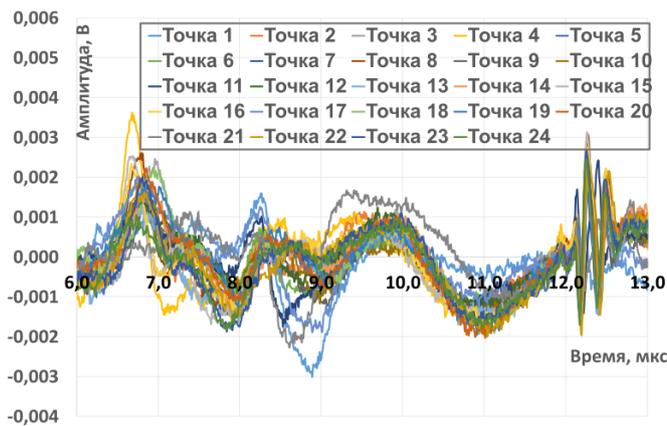
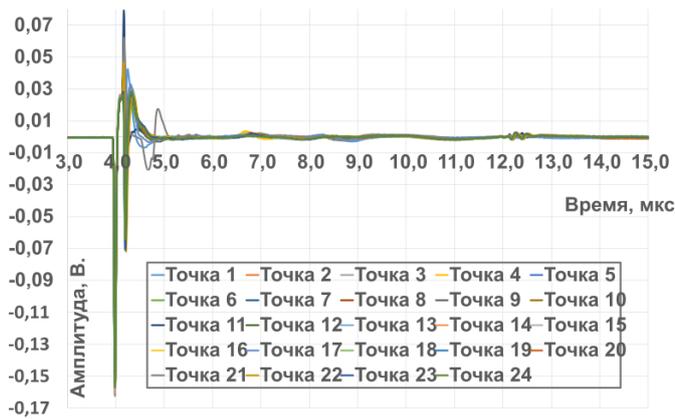


Рисунок В.9 – Временная форма сигнала образца гранита толщиной 5,23 мм, полученная с помощью эхо-режима

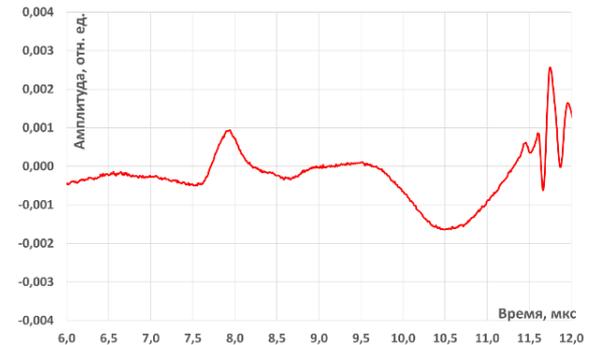
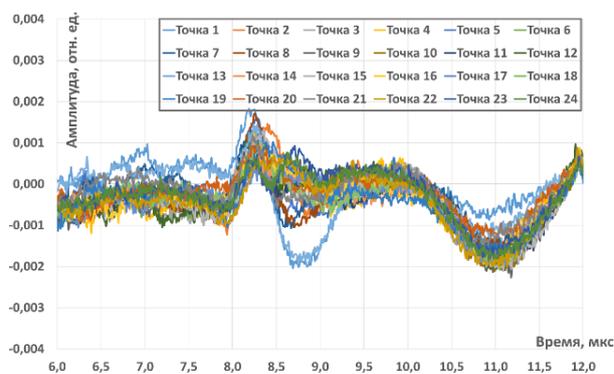
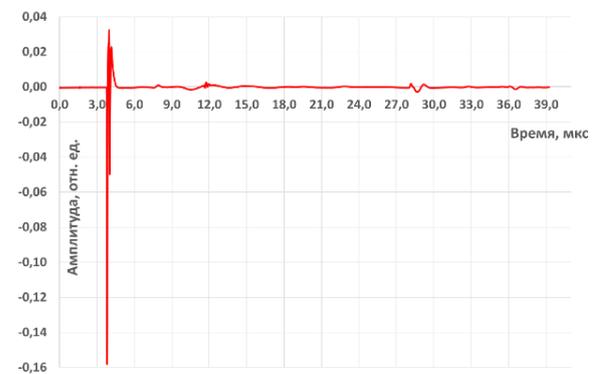
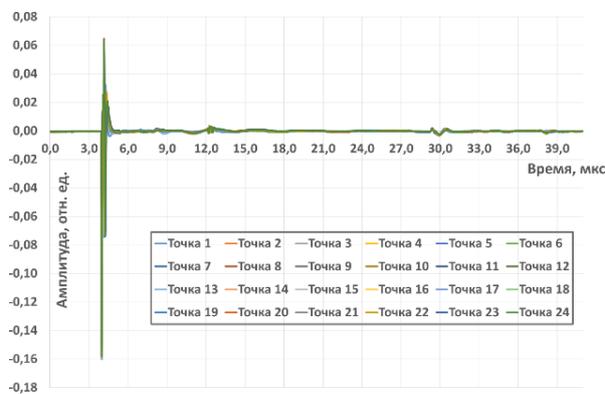


Рисунок В.10 – Временная форма сигнала образца гранита толщиной 8,0 мм, полученная с помощью эхо-режима

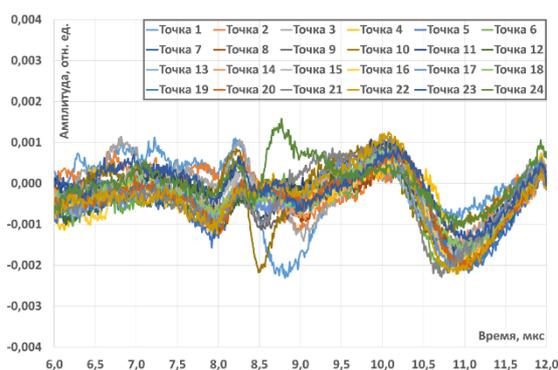
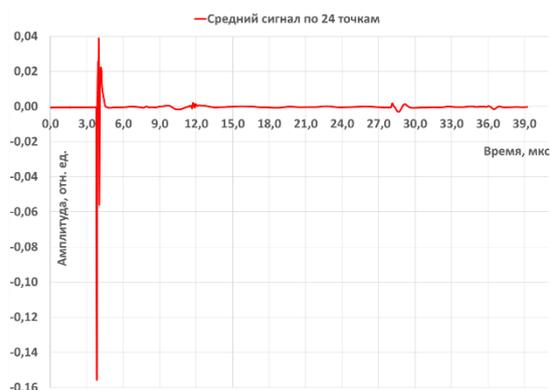
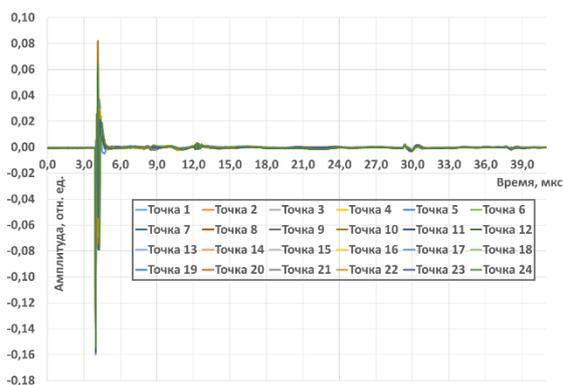


Рисунок В.11 – Временная форма сигнала образца гранита толщиной 11,0 мм, полученная с помощью эхо-режима

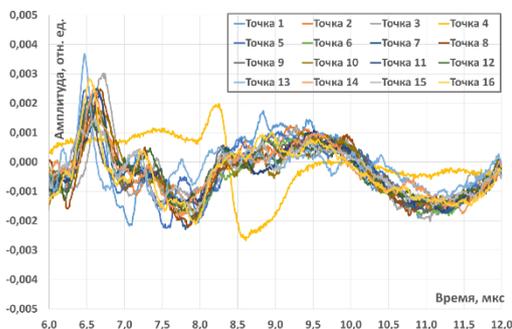
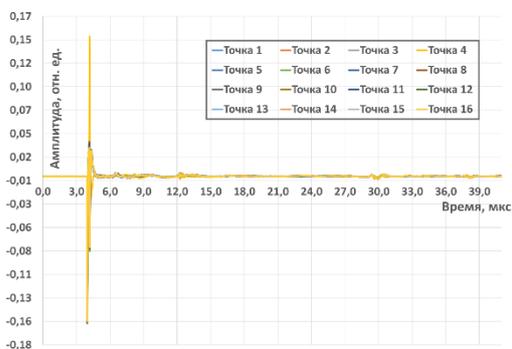


Рисунок В.12 – Временная форма сигнала образца гранита «Мансуровский» толщиной 6,0 мм, полученная с помощью эхо-режима

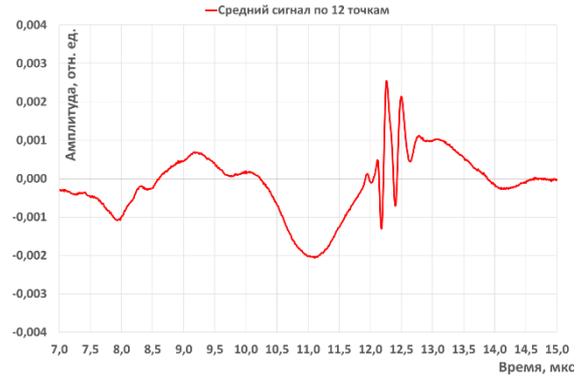
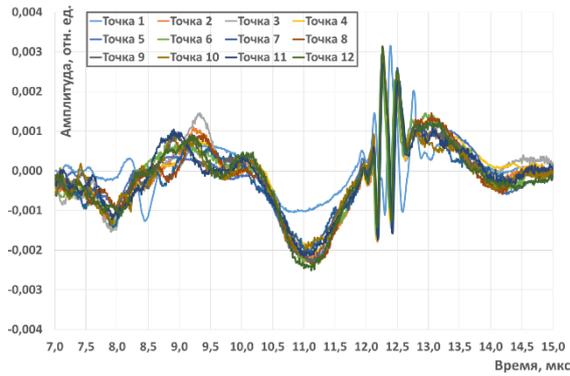
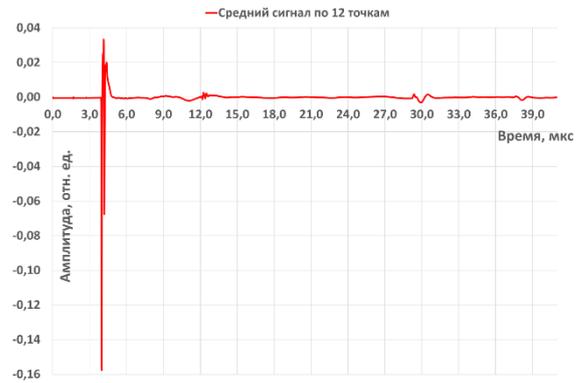
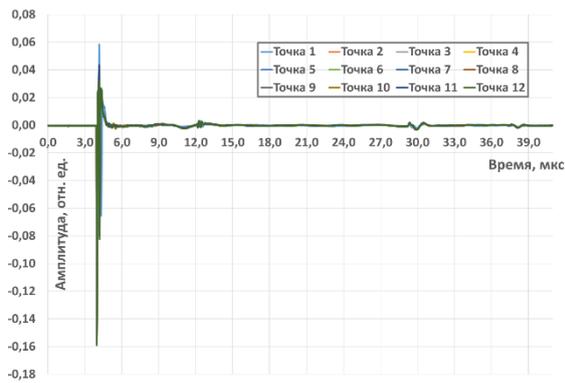


Рисунок В.13 – Временная форма сигнала образца гранита «Мансуровский» толщиной 12,3 мм, полученная с помощью эхо-режима

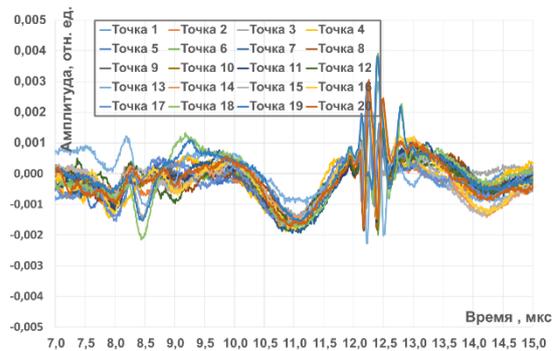
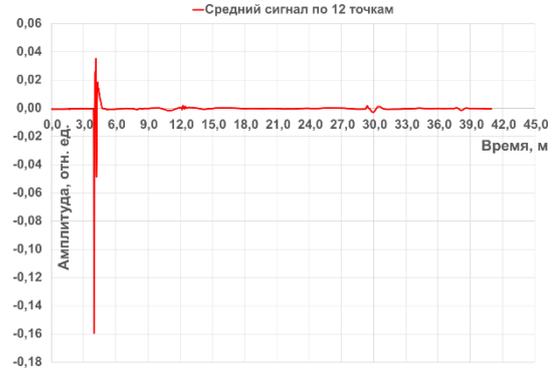
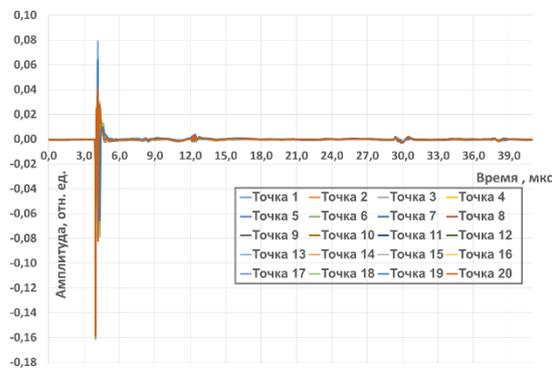


Рисунок В.14 – Временная форма сигнала образца гранита «Мансуровский» толщиной 18,0 мм, полученная с помощью эхо-режима

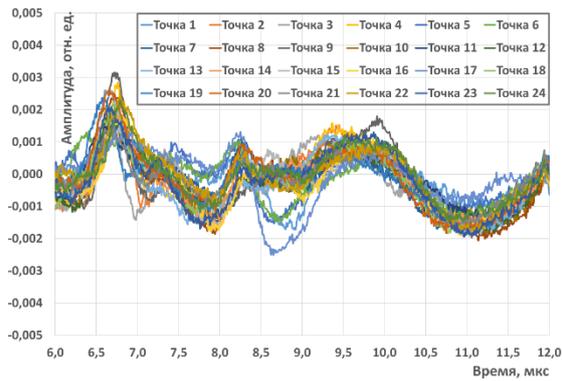
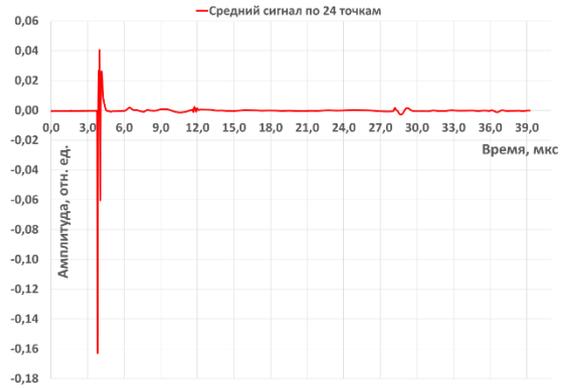
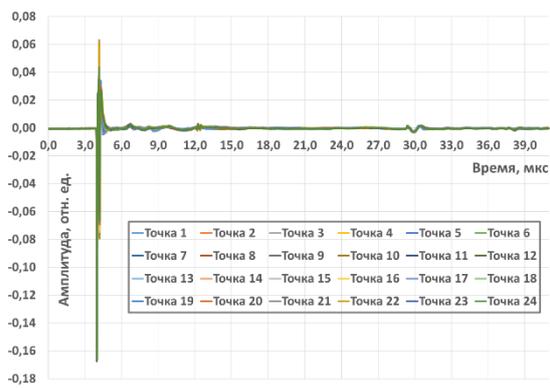


Рисунок В.15 – Временная форма сигнала образца гранита «Возрождение» толщиной 5,1 мм, полученная с помощью эхо-режима

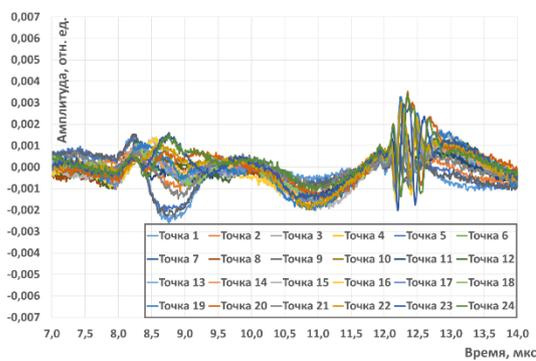
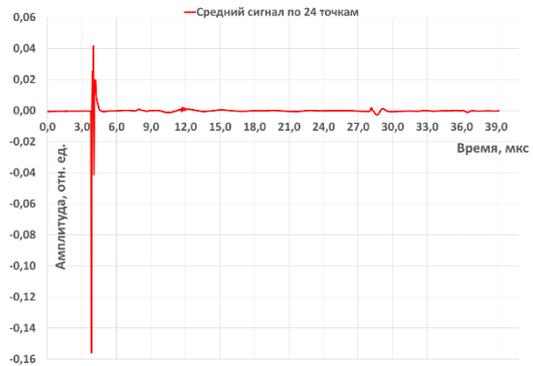
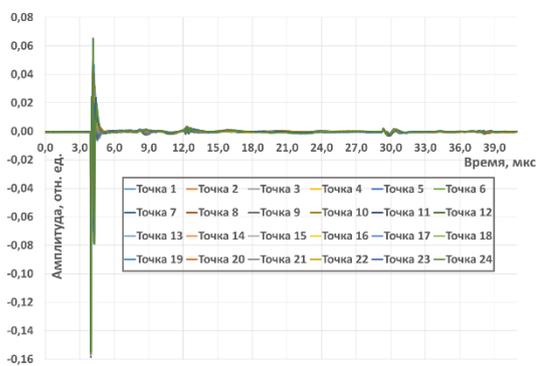


Рисунок В.16 – Временная форма сигнала образца гранита «Мансуровский» толщиной 8,3 мм, полученная с помощью эхо-режима

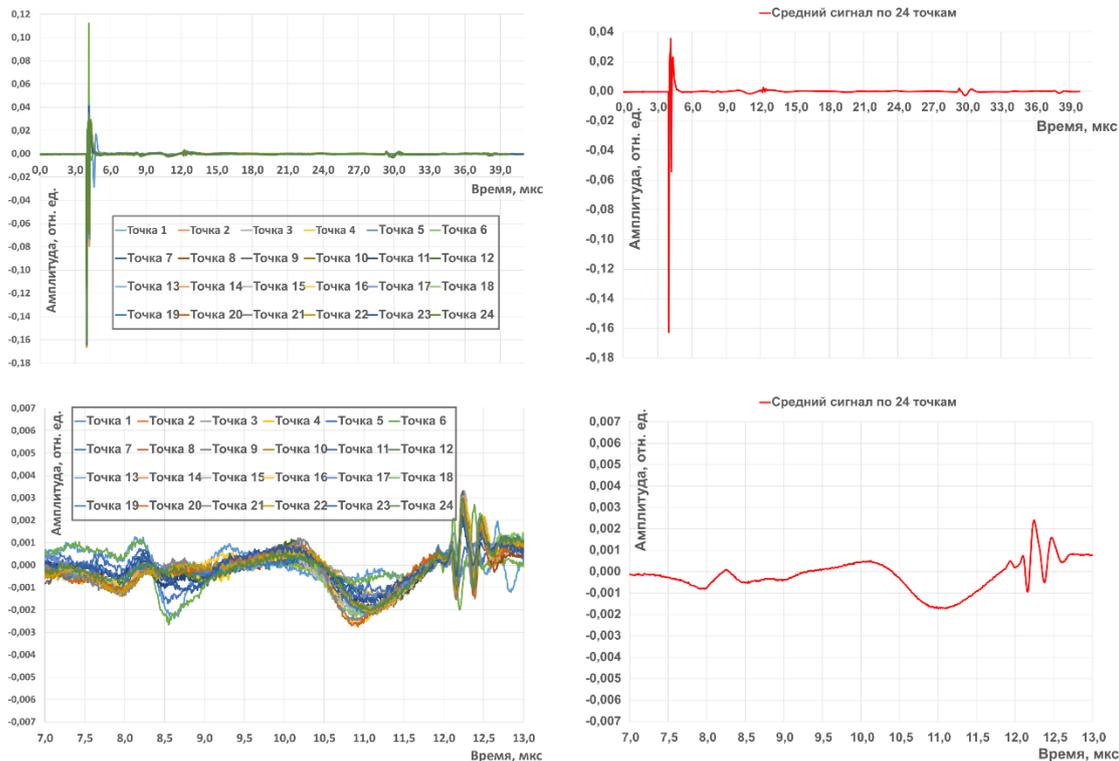


Рисунок В.17 – Временная форма сигнала образца гранита «Мансуровский» толщиной 12,1 мм, полученная с помощью эхо-режима

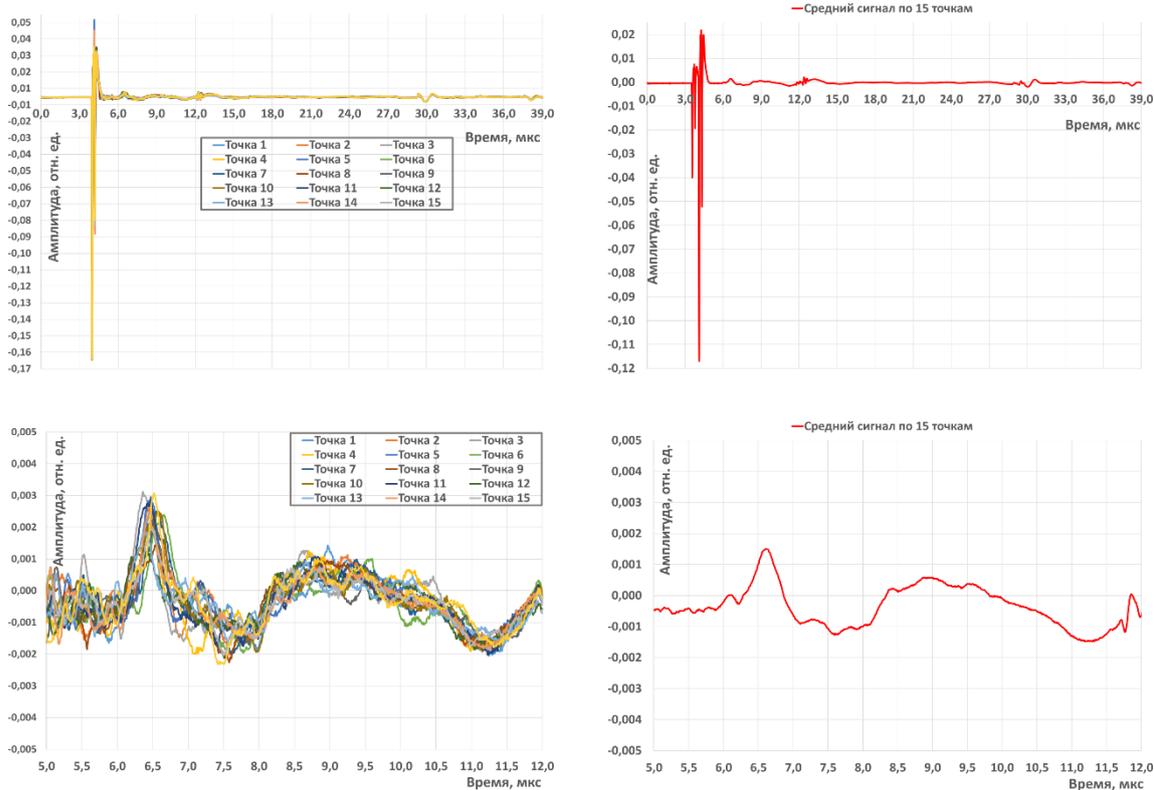


Рисунок В.18 – Временная форма сигнала образца пироксенита, полученная с помощью эхо-режима

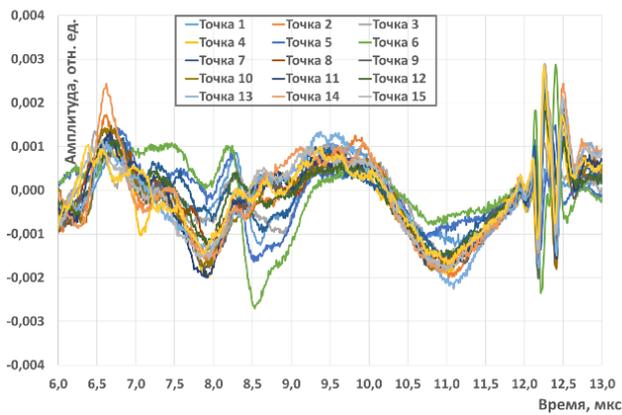
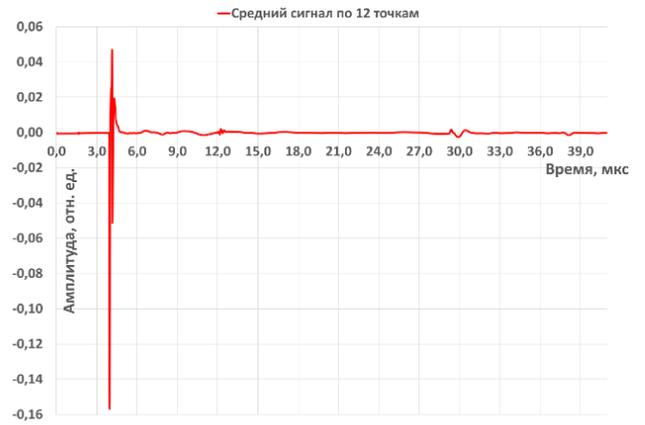
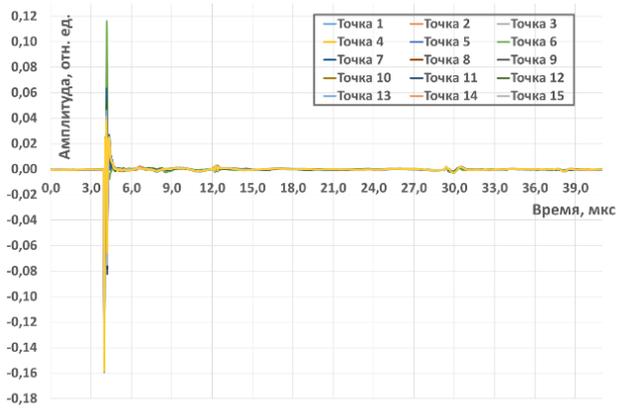


Рисунок В.19 – Временная форма сигнала образца пироксенита, полученная с помощью эхо-режима

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ВРЕМЕННЫЕ КАРТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ИМПУЛЬСОВ РАЗЛИЧНЫХ ВОЛН ОТ УГЛА ПОВОРОТА ОБРАЗЦА.

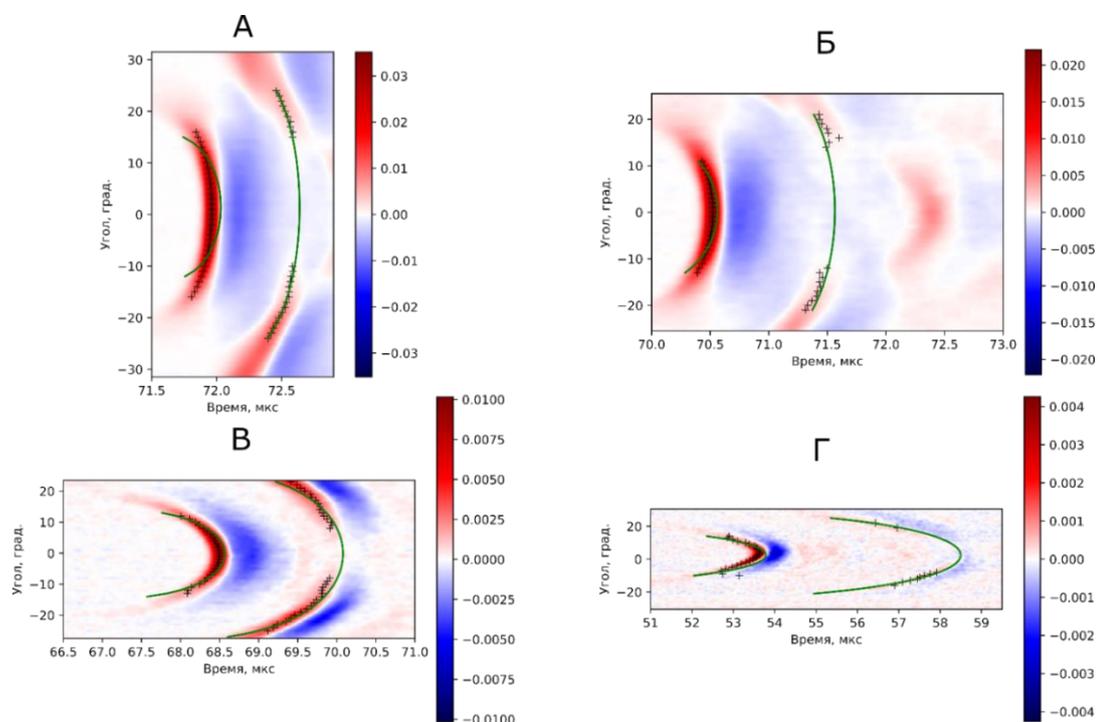


Рисунок Г.1 – Карты распределения амплитуды сигнала импульсов продольных и сдвиговых волн от времени распространения импульса при определенном угле падения в образцах долерита толщиной 3,10 мм (А), 5,09 мм (Б), 9,94 (В) и 35,10 мм (Г)

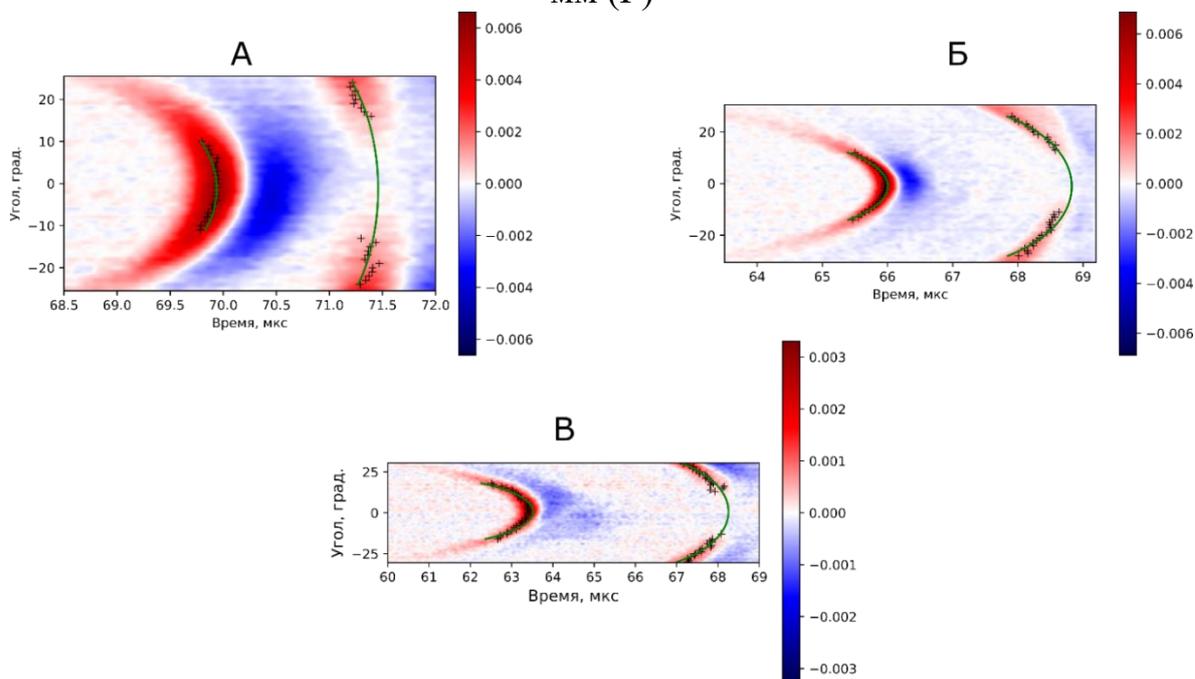


Рисунок Г.2 – Карты распределения амплитуды сигнала импульсов продольных и сдвиговых волн от времени распространения импульса при определенном угле падения в образцах известняка толщиной 7,81 мм (А), 15,79 мм (Б) и 49,3 мм (В)

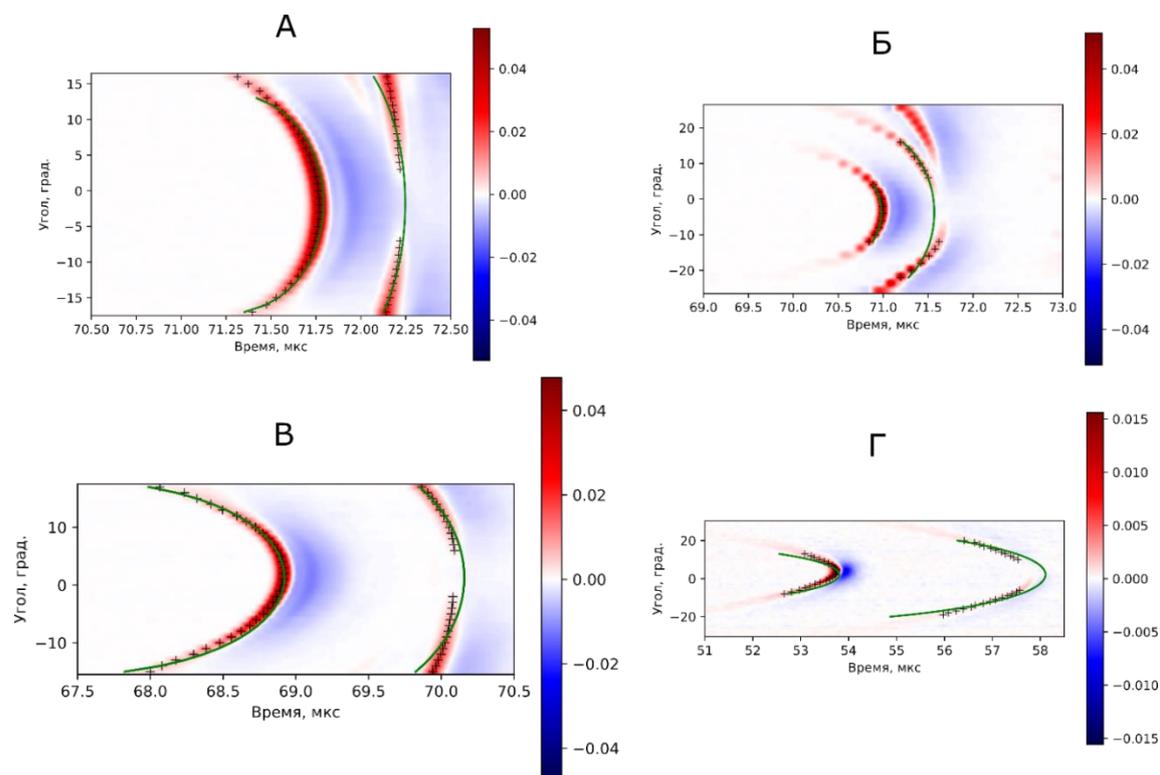


Рисунок Г.3 – Карты распределения амплитуды сигнала импульсов продольных и сдвиговых волн от времени распространения импульса при определенном угле падения в образцах аргиллите толщиной 3,67 мм (А), 5,71 мм (Б), 9,82 мм (В) и 40,5 мм (Г)

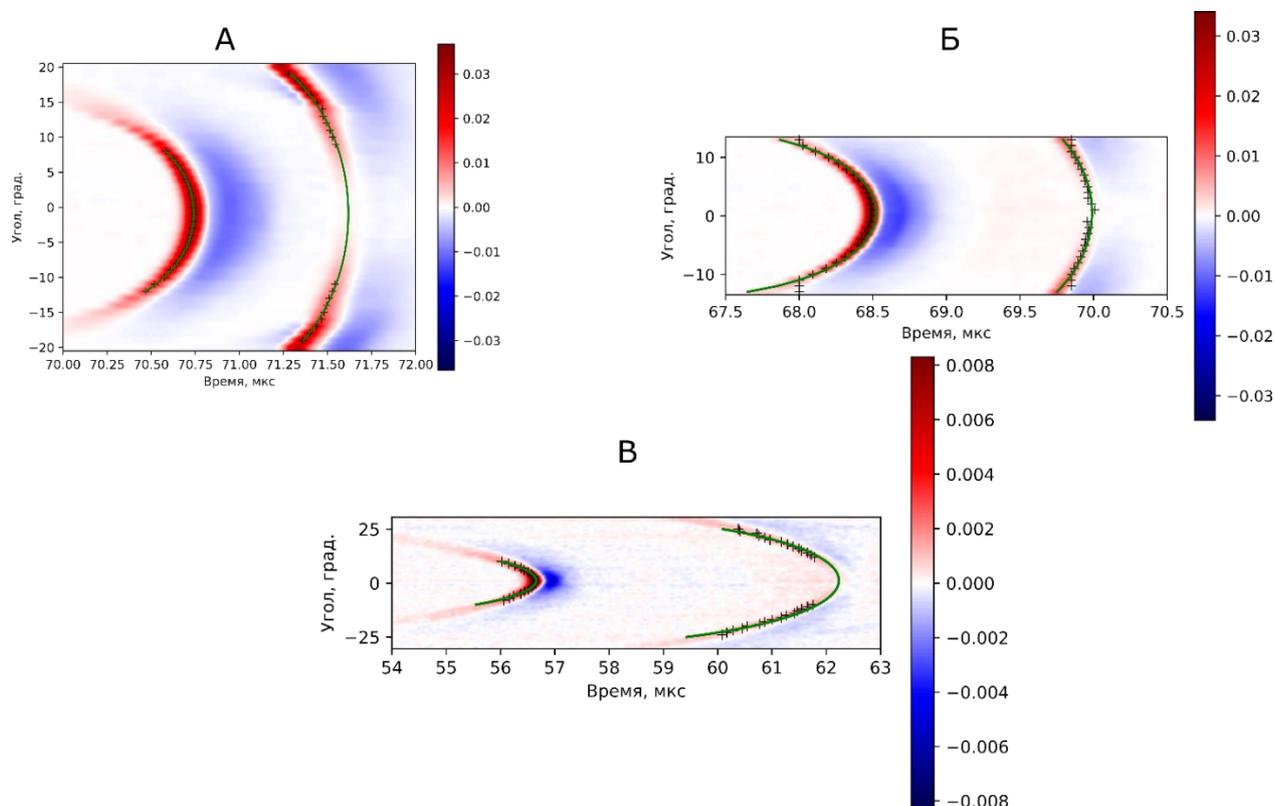


Рисунок Г.4 – Карты распределения амплитуды сигнала импульсов продольных и сдвиговых волн от времени распространения импульса при определенном угле падения в образцах мрамора толщиной 5,82 мм (А), 10,07 мм (Б) и 40,7 мм (В)

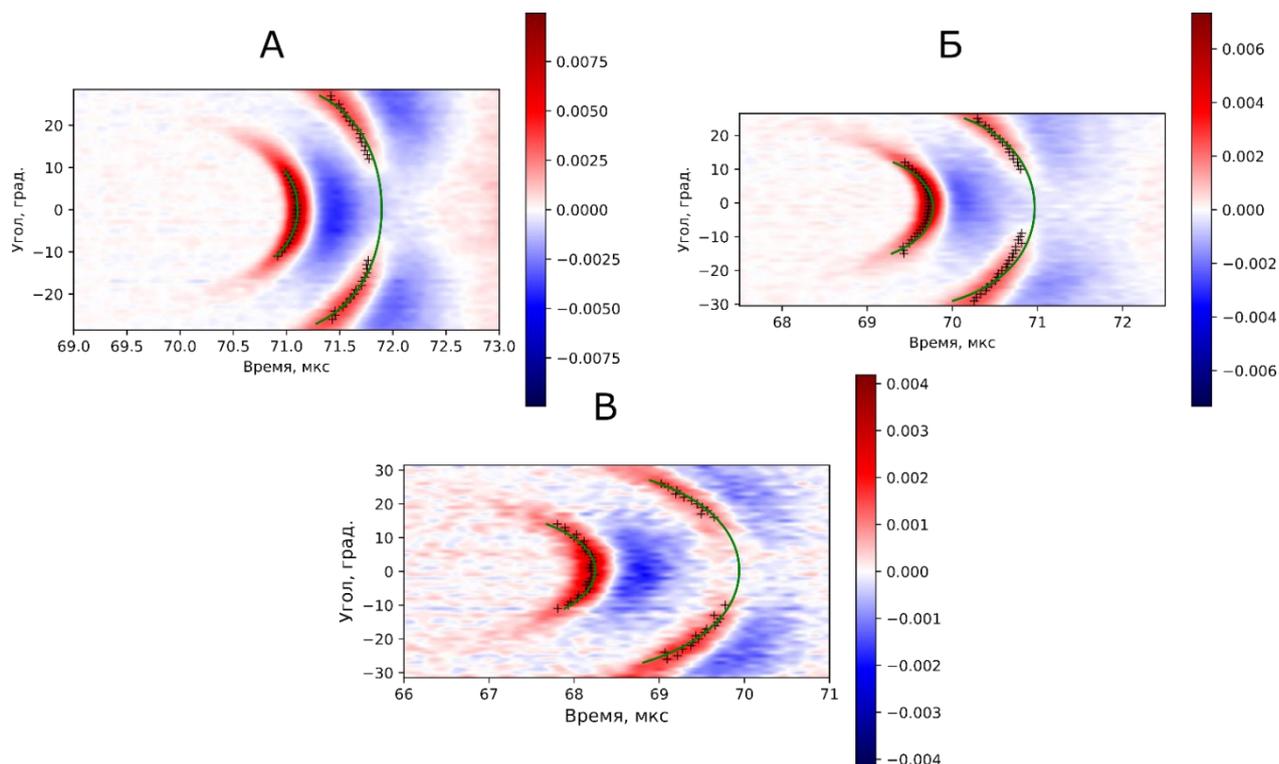


Рисунок Г.5 – Карты распределения амплитуды сигнала импульсов продольных и сдвиговых волн от времени распространения импульса при определенном угле падения в образцах гранита «Возрождение» толщиной 8,02 мм (А), 11,86 мм (Б) и 30,6 мм (В)

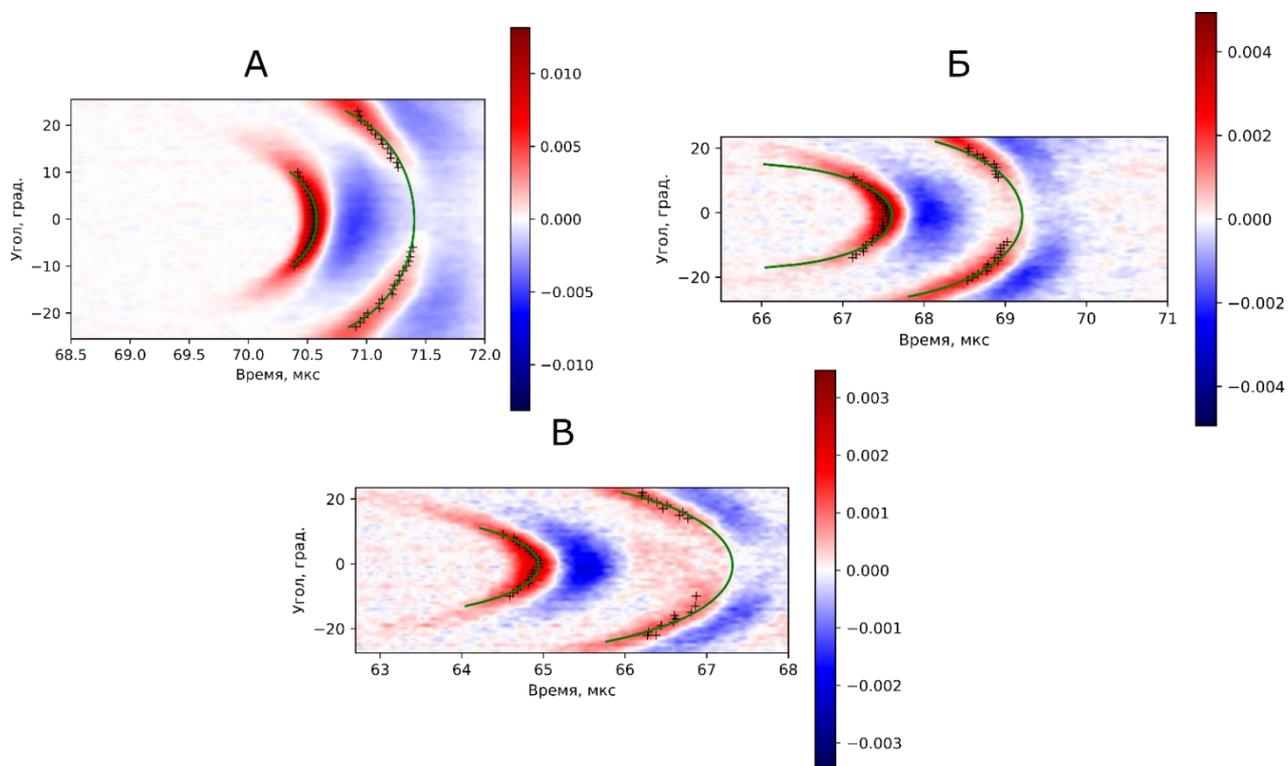


Рисунок Г.6 – Карты распределения амплитуды сигнала импульсов продольных и сдвиговых волн от времени распространения импульса при определенном угле падения в образцах гранита «Мансуровский» толщиной 12,33 мм (А), 18,04 мм (Б) и 30,1 мм (В)

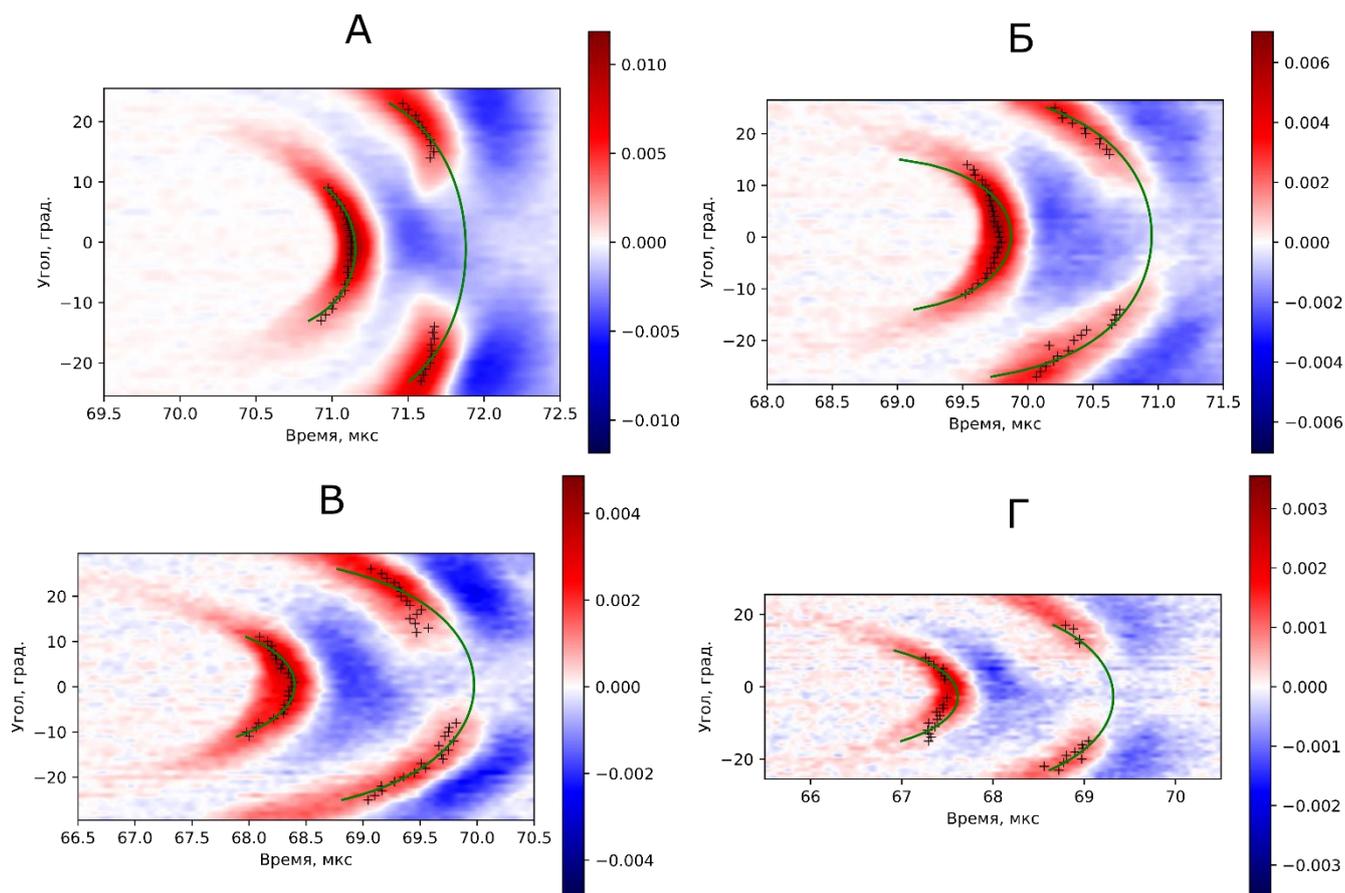


Рисунок Г.7 – Карты распределения амплитуды сигнала импульсов продольных и сдвиговых волн от времени распространения импульса при определенном угле падения в образцах гранита «Юрьевский» толщиной 7,46 мм (А), 10,37 мм (Б), 12,29 мм (В) и 30,9 мм (Г)

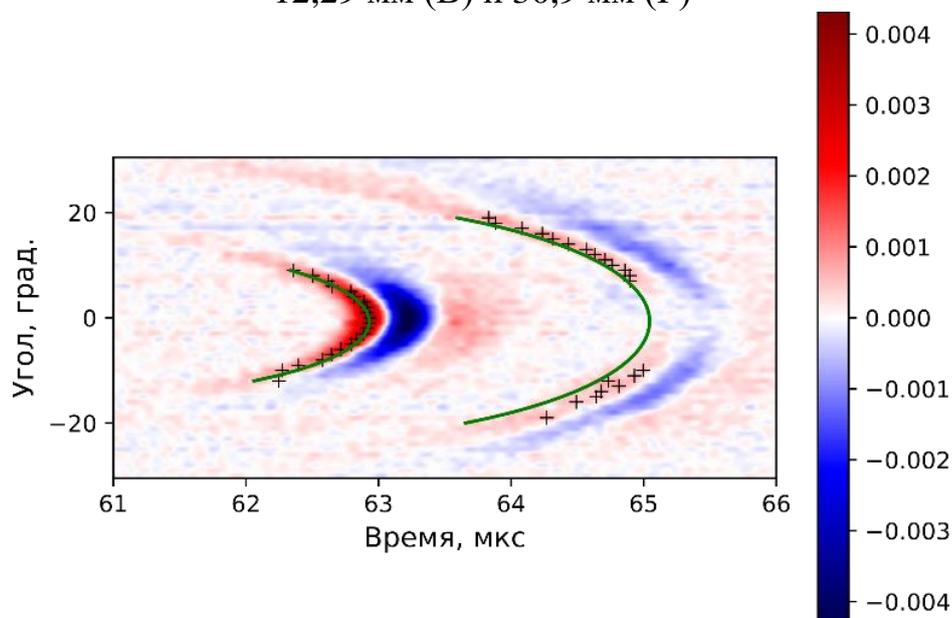


Рисунок Г.8 – Карта распределения амплитуды сигнала импульсов продольных и сдвиговых волн от времени распространения импульса при определенном угле падения в полноразмерном образце пироксенита толщиной 31,0 мм

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д. ДИСПЕРСИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ «СКОРОСТЬ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ-ЧАСТОТА»

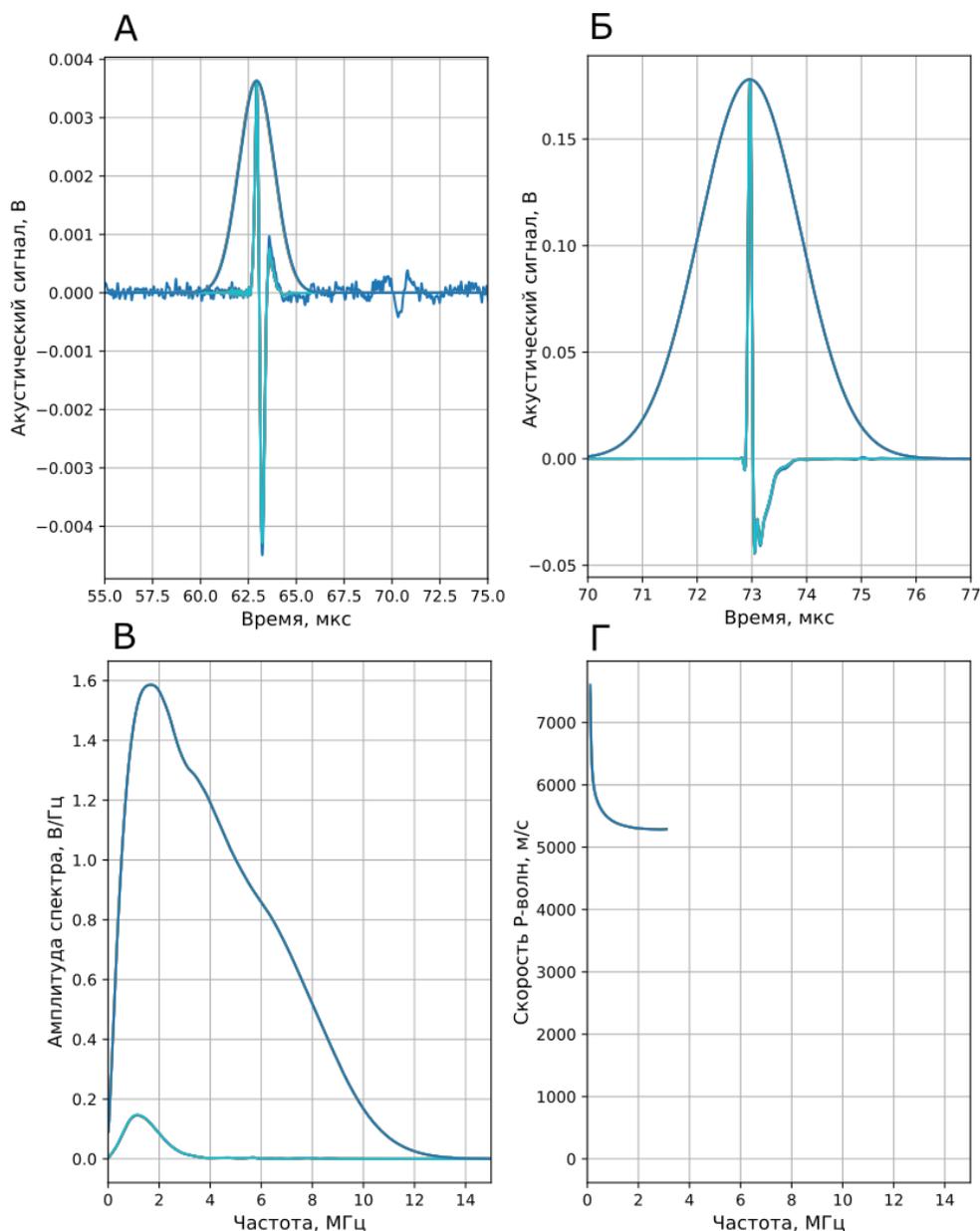


Рисунок Д.1 – Обработка сигналов, полученных на полноразмерных образцах мрамора (Prx 1.1) с помощью теневого режима работы ЛУД. Голубой цвет соответствует фильтрованным и обработанным сигналам, темно-синий – исходным сигналам. А – Сигнал импульса (в данном случае, продольной) волны при определенном угле поворота образца (в данном случае, при 0 градусов) с построенной оконной функцией, Б – исходный, отфильтрованный референсный сигнал и оконная функция для него, В – построенная зависимость амплитуды спектра от частоты для референсного сигнала (темно-синий цвет) и сигнала, прошедшего через образец (голубой), Г – построенная зависимость значения скорости продольной волны от частоты в полосе от 0,02 до 2 МГц

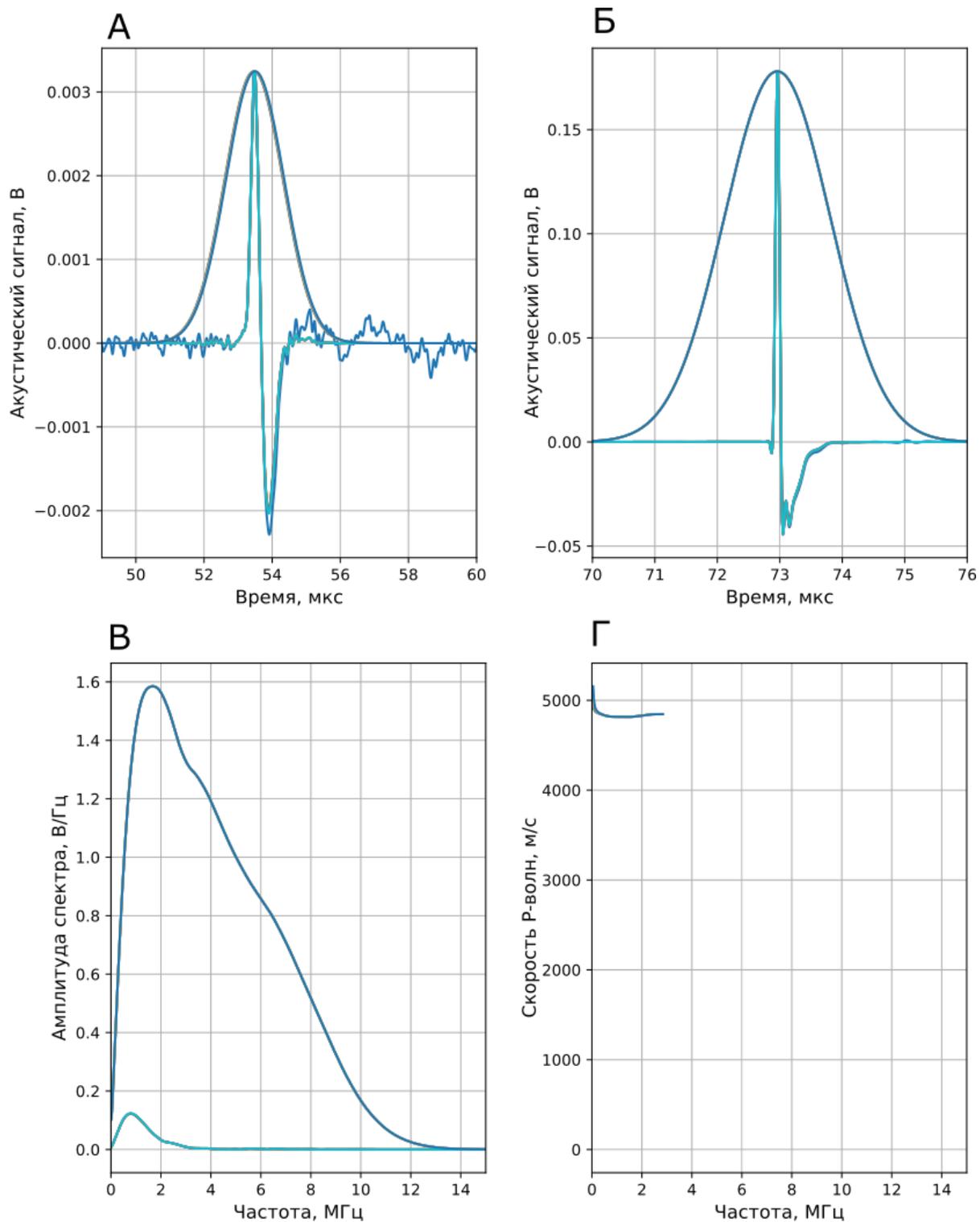


Рисунок Д.2 – Обработка сигналов, полученных на полноразмерных образцах мрамора (Dbs 1.1) с помощью теневого режима работы ЛУД

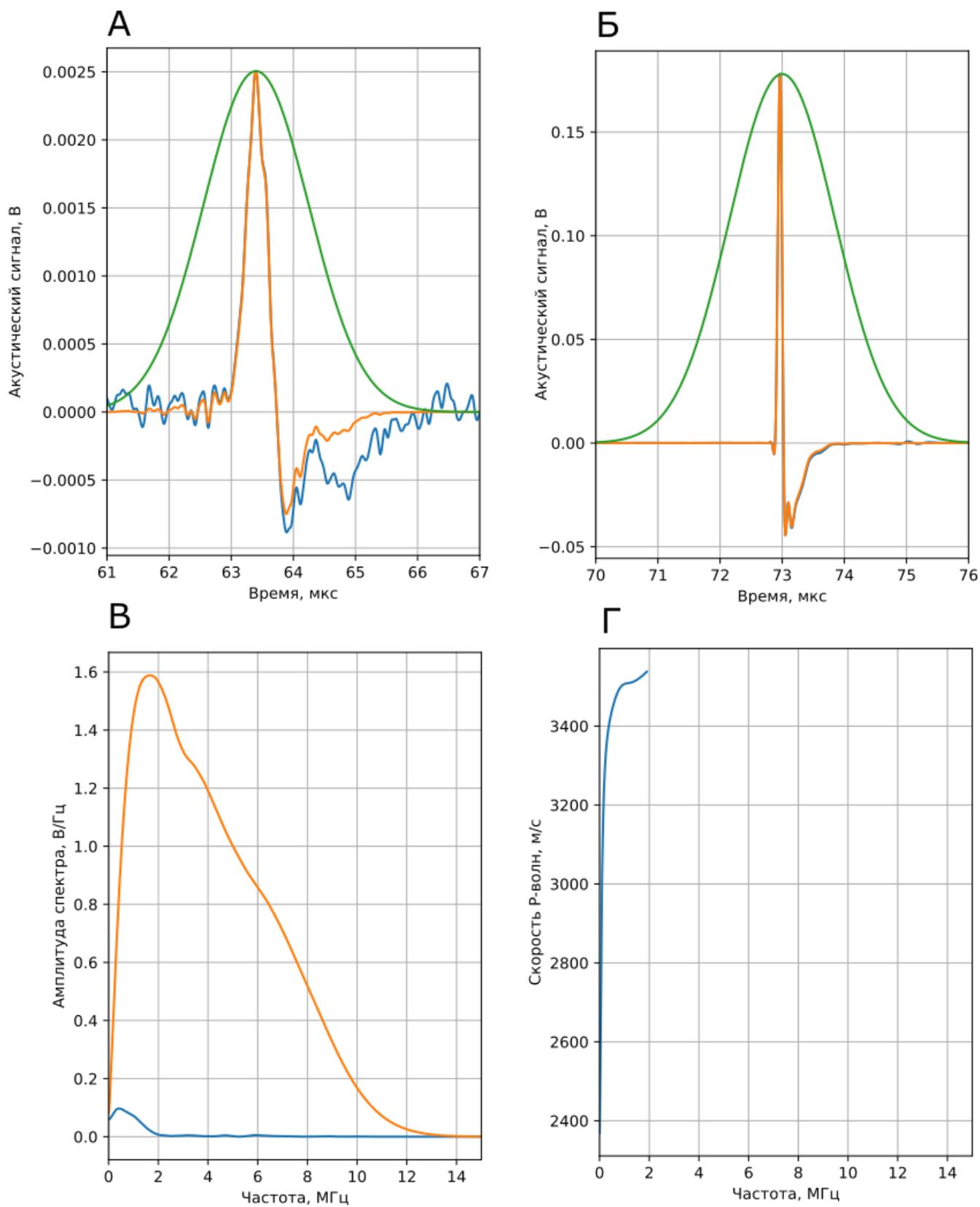


Рисунок Д.3 – Обработка сигналов, полученных на полноразмерных образцах мрамора (Lms 1.1) с помощью теневого режима работы ЛУД

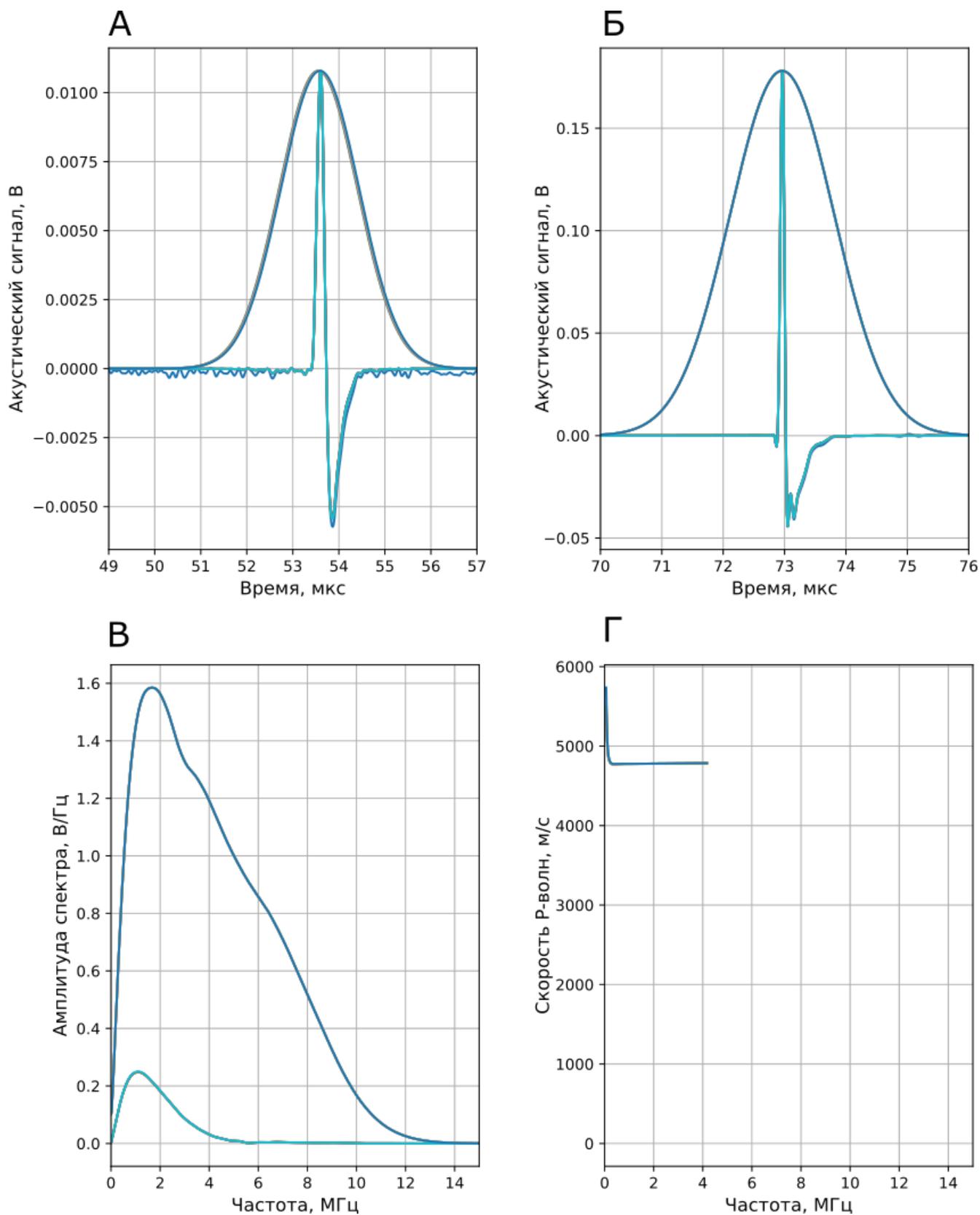


Рисунок Д.4 – Обработка сигналов, полученных на полноразмерных образцах мрамора (Arg 1.1) с помощью теневого режима работы ЛУД

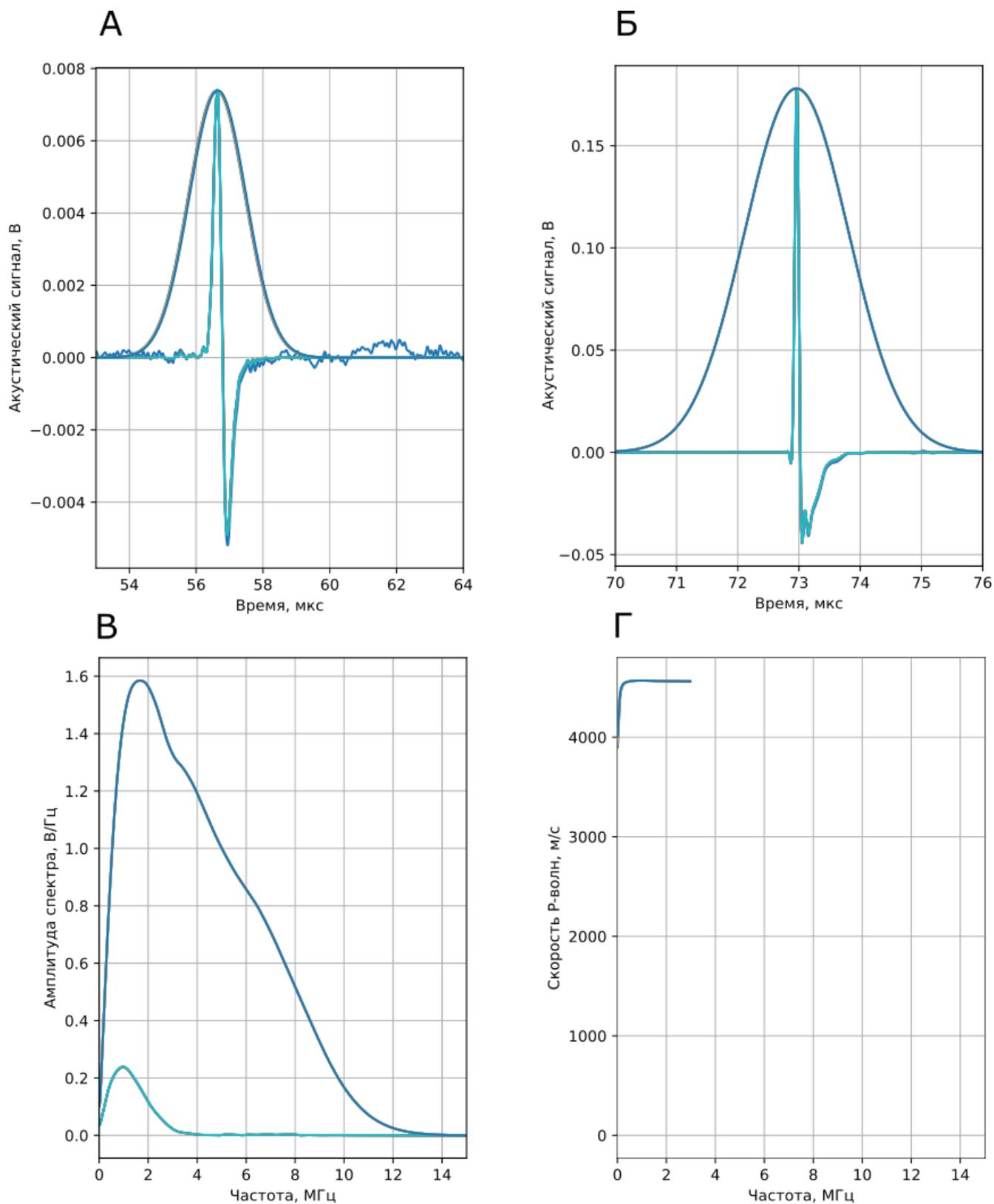


Рисунок Д.5 – Обработка сигналов, полученных на полноразмерных образцах мрамора (Mrb 1.1) с помощью теневого режима работы ЛУД

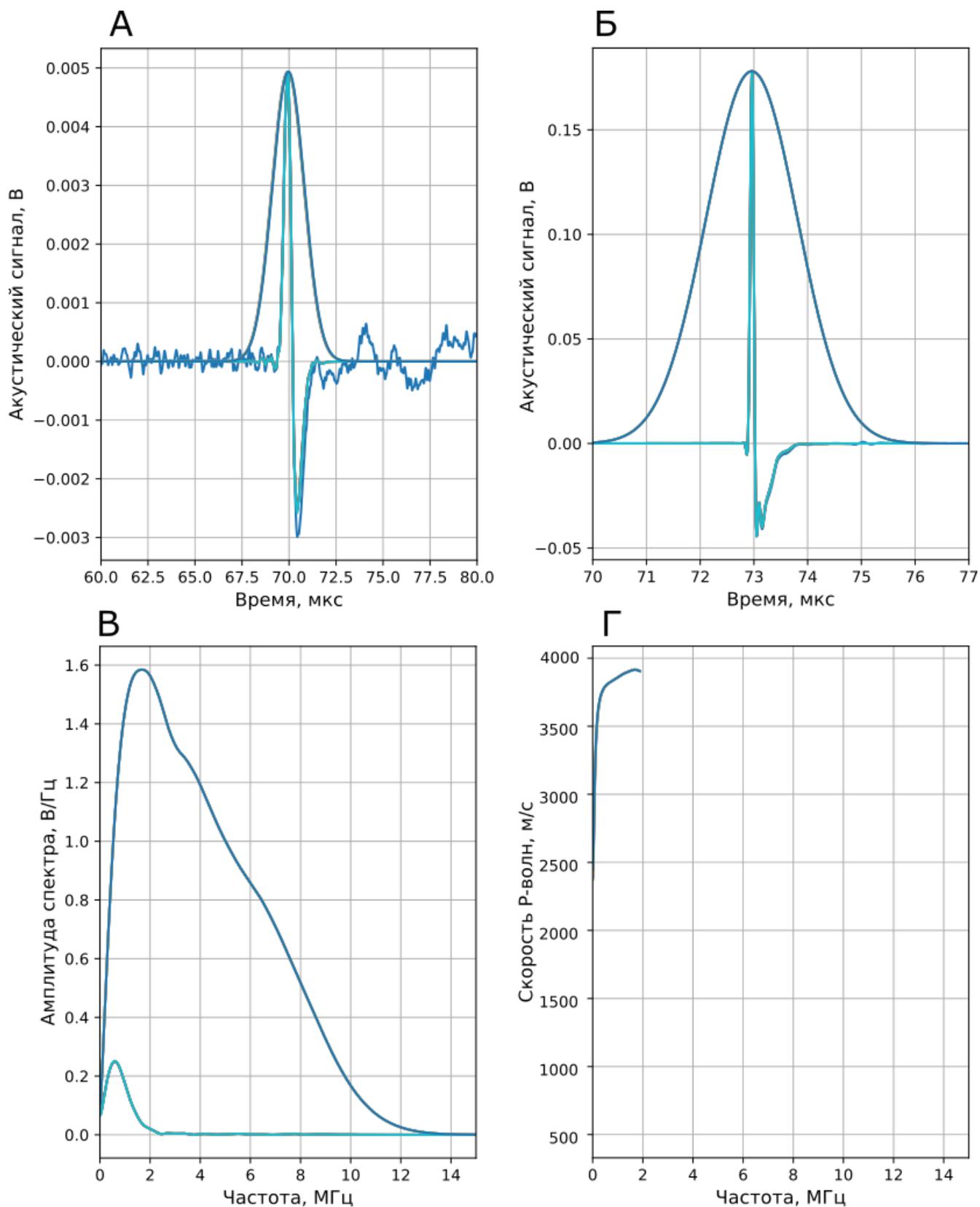


Рисунок Д.6 – Обработка сигналов, полученных на полноразмерных образцах мрамора (Shg 1.1) с помощью теневого режима работы ЛУД.

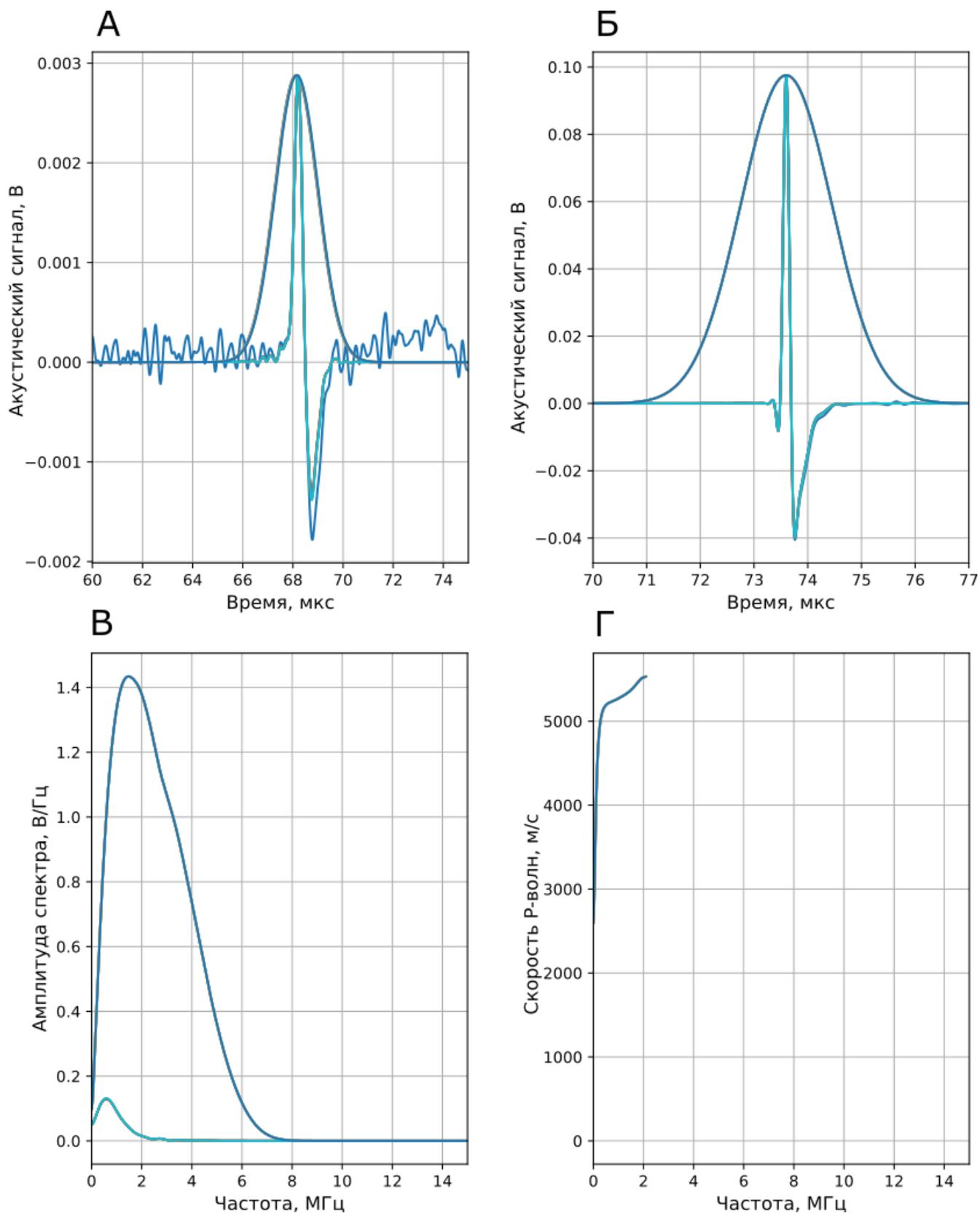


Рисунок Д.7 – Обработка сигналов, полученных на полноразмерных образцах мрамора (GrV 1.1) с помощью теневого режима работы ЛУД.

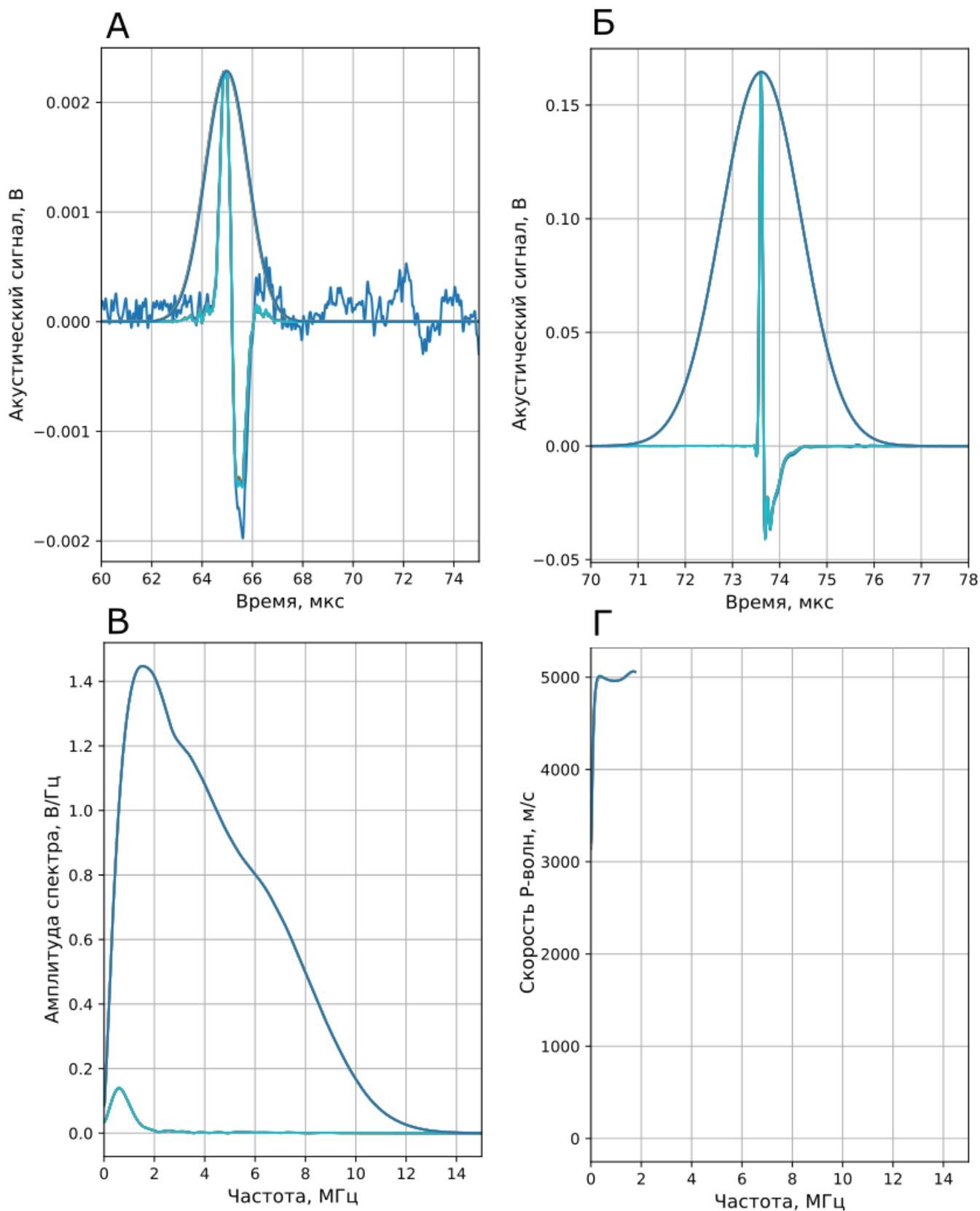


Рисунок Д.8 – Обработка сигналов, полученных на полноразмерных образцах мрамора (GrM 1.1) с помощью теневого режима работы ЛУД.

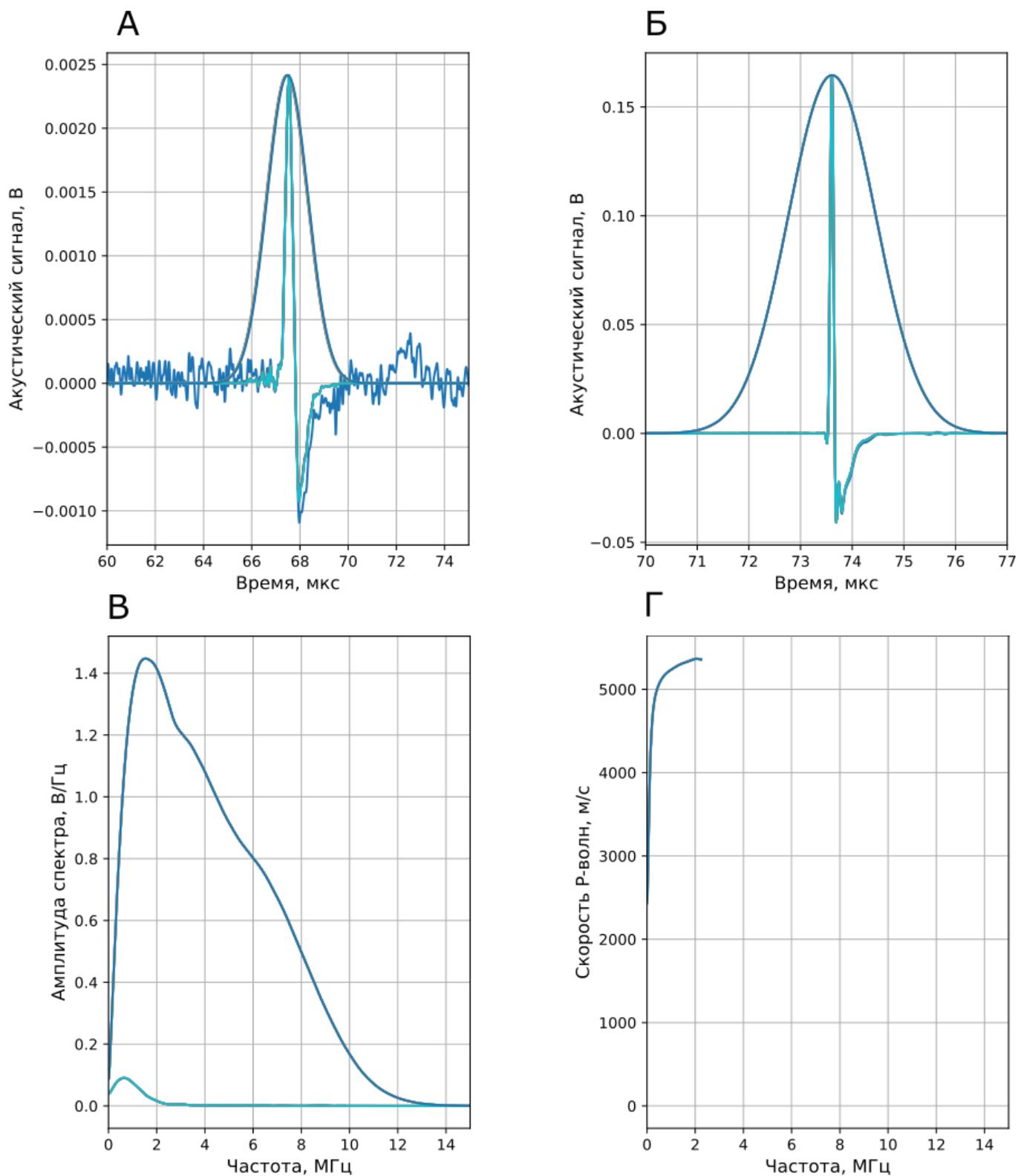


Рисунок Д.9 – Обработка сигналов, полученных на полноразмерных образцах мрамора (GrU 1.1) с помощью теневого режима работы ЛУД.

# ПРИЛОЖЕНИЕ Е. РАЗРАБОТАННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»  
Кафедра физических процессов горного производства и геоконтроля

УДК 622.611.4:620.179.16

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор НИТУ «МИСиС»  
по науке и инновациям,



М.Р. Филонов

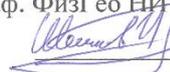
2021 г.

## МЕТОДИКА

определения динамических модулей упругости разномасштабных образцов  
горных пород с использованием комплексного метода лазерной ультразвуковой  
диагностики

Автор:

Аспирант каф. ФизГео НИТУ «МИСиС»

 И.А. Шибяев

Методика рассмотрена и одобрена  
на заседании кафедры ФизГео НИТУ «МИСиС»

Протокол № 3 от «22» октября 2021 г.

 д.ф.-м.н., проф., В.А. Винников

«22» октября 2021 г.

МОСКВА 2021

Рисунок Е.1 – Титульный лист разработанной методики

## Содержание

1. Общие положения.....	3
2. Требования к подготавливаемым образцам.....	4
3. Описание установки Геоскан-02МУ и принцип ее работы.....	4
3.1. Общий алгоритм работы с установкой Геоскан-02МУ лазерной ультразвуковой диагностики, работающей в теновом иммерсионном режиме....	7
3.2. Обработка результатов экспериментов .....	8
3.2.1 Расчёт значения скорости упругой продольной волны в воде .....	8
4. Описание установки УДЛ-2М и принцип ее работы .....	12
5. Список использованных источников.....	14

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Настоящая методика устанавливает порядок выполнения расчетов динамических модулей упругости образцов горных пород разных размеров с помощью методов лазерной ультразвуковой диагностики (теневого иммерсионного метода и эхо-методов).

1.2 Настоящие Методические рекомендации распространяются на лабораторные методы испытания акустических свойств образцов горных пород.

1.3 Рекомендации содержат: требования к подготовке исследуемых образцов горных пород, алгоритм работы с установкой теневого иммерсионного режима работы лазерной ультразвуковой диагностики Геоскан-02МУ и эхо-режима УДЛ-2М.

1.4 В основе настоящей методики лежат положения теории генерации и распространения широкополосных ультразвуковых импульсов упругих волн различных типов.

1.5 Рекомендации предназначены для использования в лабораторных условиях на установках лазерной ультразвуковой диагностики (по типу Геоскан-02МУ, УДЛ-2М и др).

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К ПОДГОТАВЛИВАЕМЫМ ОБРАЗЦАМ

Для проведения исследований методом лазерной ультразвуковой диагностики с помощью иммерсионной установки «Геоскан-02МУ» могут использоваться образцы произвольной формы с плоскопараллельными двумя границами.

Точность шлифовки поверхности и плоскопараллельность торцевых поверхностей должны быть не менее 0,01 мм, что обеспечивает высокую точность в измерении скорости распространения упругих импульсов.

Толщина исследуемых объектов может варьироваться от пары миллиметров до 8 см.

## 3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ГЕОСКАН-02МУ И ПРИНЦИП ЕЕ РАБОТЫ

Экспериментальная установка лазерной ультразвуковой диагностики Геоскан-02МУ, работающая в иммерсионном теневом режиме, предназначена для акустических исследований образцов различных материалов [1-3].

С помощью твердотельного Nd:YAG-лазера (1) с модуляцией добротности генерируется сверхкороткий лазерный импульс длительностью 10 нс, энергией импульса 100 мкДж., проходящий по оптоволокну на оптико-акустический генератор (далее ОА генератор). Далее при термоупругом эффекте в среде ОА генератора (2) возникают импульсы продольных волн, которые распространяются в кювете (5) с водой до границы образца (3), далее проходят путь, равный толщине образца, и последнюю часть пути распространяется от границы образца до приемника (4), с помощью которого они преобразуются в электрические и проходя через усилитель попадают на устройство сбора и обработки данных в виде компьютера (6). Фотография и схема установки приведена на рисунке 1 и 2, соответственно.

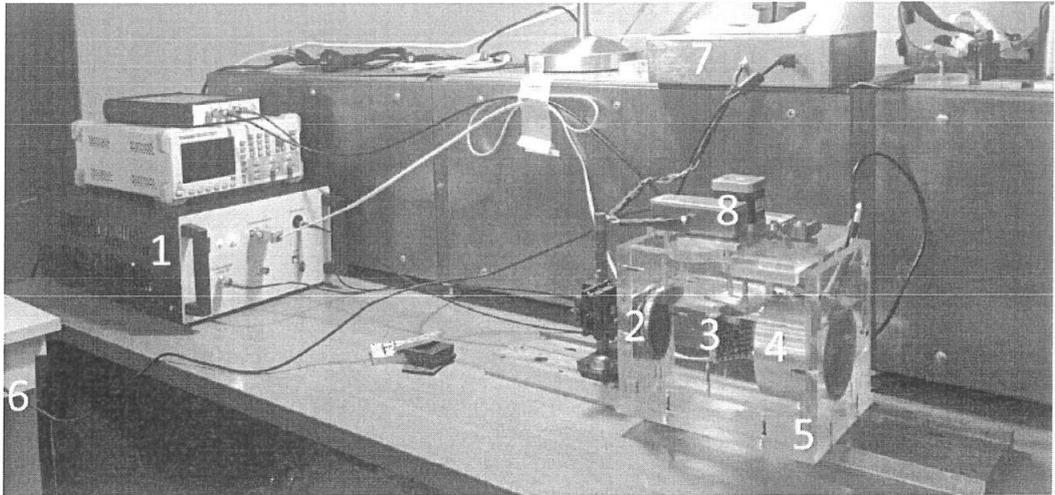


Рисунок 1 – Фотография установки Геоскан-02МУ, работающей в теновом иммерсионном режиме, основные узлы: 1 – блок с лазерным источником Nd:Yag и аналого-цифровым преобразователем, 2 – генератор, 3 – образец, закрепленный в зажимном устройстве поворотной оси, 4 – пьезоприемник, 5 – кювета с дистиллированной водой, 6 – кабель, ведущий к компьютеру для обработки данных, 7 – микроконтроллер и блок питания, 8 – шаговый двигатель, позволяющий управлять поворотом образца

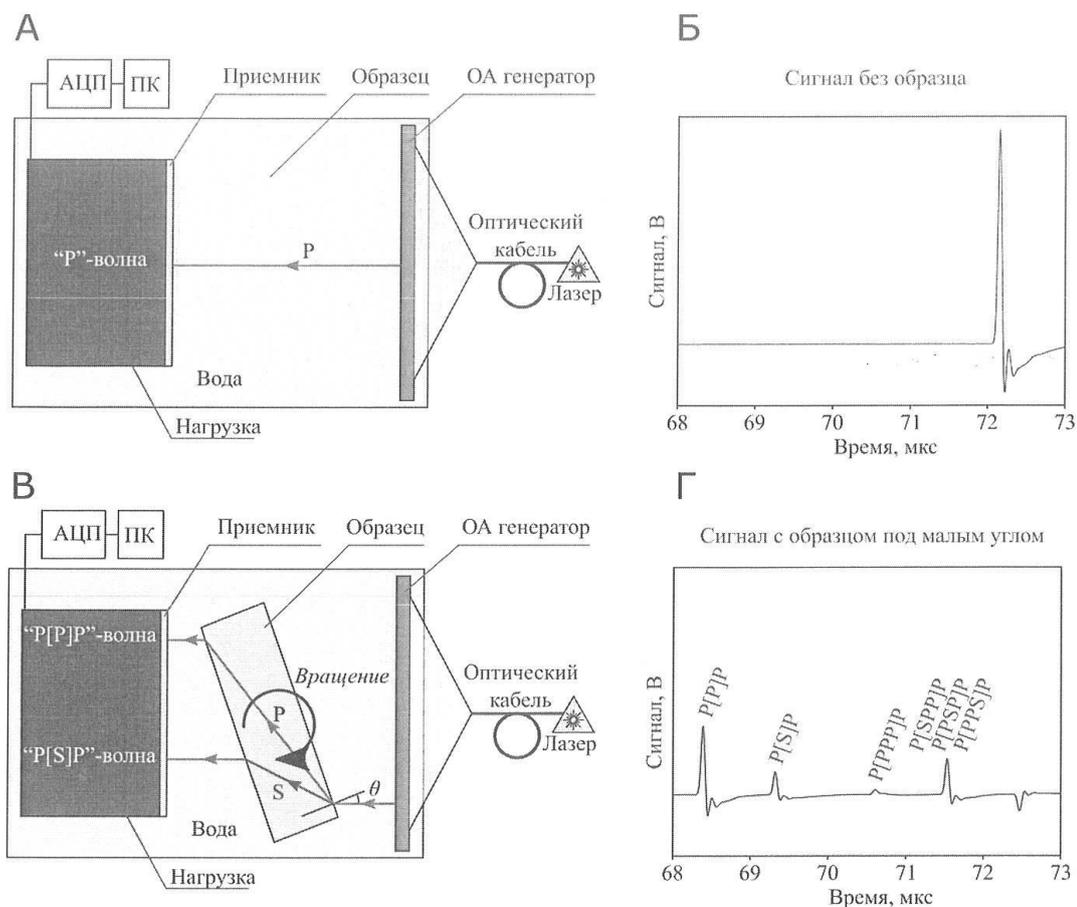


Рисунок 2 – Схема экспериментальной лазерной ультразвуковой иммерсионной установки, работающей в тенево-режиме без образца и с образцом (слева, А и В) и типичные формы сигналов, зарегистрированные экспериментально (справа, Б и Г). Б - форма сигнала, записанная без образца в кювете (синий цвет), Г - аннотированная форма сигнала с образцом кварцевого стекла, зафиксированным на угол  $\approx 8,1^\circ$  (коричневый цвет).

Методика может быть использована для определения динамических модулей упругости разномасштабных образцов горных пород на основе прецизионного измерения скоростей распространения продольных и сдвиговых упругих волн.

3.1. Общий алгоритм работы с установкой Геоскан-02МУ лазерной ультразвуковой диагностики, работающей в теновом иммерсионном режиме

- а) Кювета заполняется водой (желательно дистиллированной и оставляется на некоторое время для достижения температурного равновесия с окружающей средой, в том числе с целью избавления от пузырьков растворенного газа в ней);
- б) Подключается лазер, наконечник световода располагается так, чтобы ширина лазерного луча на генераторе превышала 3 см (это необходимо, поскольку образец должен располагаться в пределах перетяжки акустического пучка, где волны можно было бы считать плоскими);
- в) Все узлы системы юстируются с целью получения качественного сигнала. А именно ОА-генератор, приемник, наконечник волокна, подающего лазерный импульс настраиваются так, чтобы акустический импульс, проходящий в воде напрямую от генератора к приемнику имел максимальную амплитуду, самую короткую продолжительность, минимальное время прохождения и стабильную форму импульса;
- г) Измеряется скорость акустической продольной волны в воде без образца  $c_w$  и время распространения акустического импульса  $T_w$ ;
- д) Далее в зажимное устройство (по типу миниатюрных тисков) устанавливается подготовленный образец исследуемого материала, и помещается между генератором и приемником с целью вращения до тех пор, пока продольная волна почти не исчезала из-за полного внутреннего отражения. Таким образом определялся максимальный угол поворота образца относительно параллели и критические углы;
- е) Образец вращают и регистрируют формы сигналов в каждом угловом положении  $i_1$ .

На рисунке 1 показано, что форма трансформированных волн «P [P] P» и «P [S] P» почти такая же, как у эталонного сигнала, записанного без образца.

Подробная схема распространения волн в образце представлена на рисунке 3 ниже.

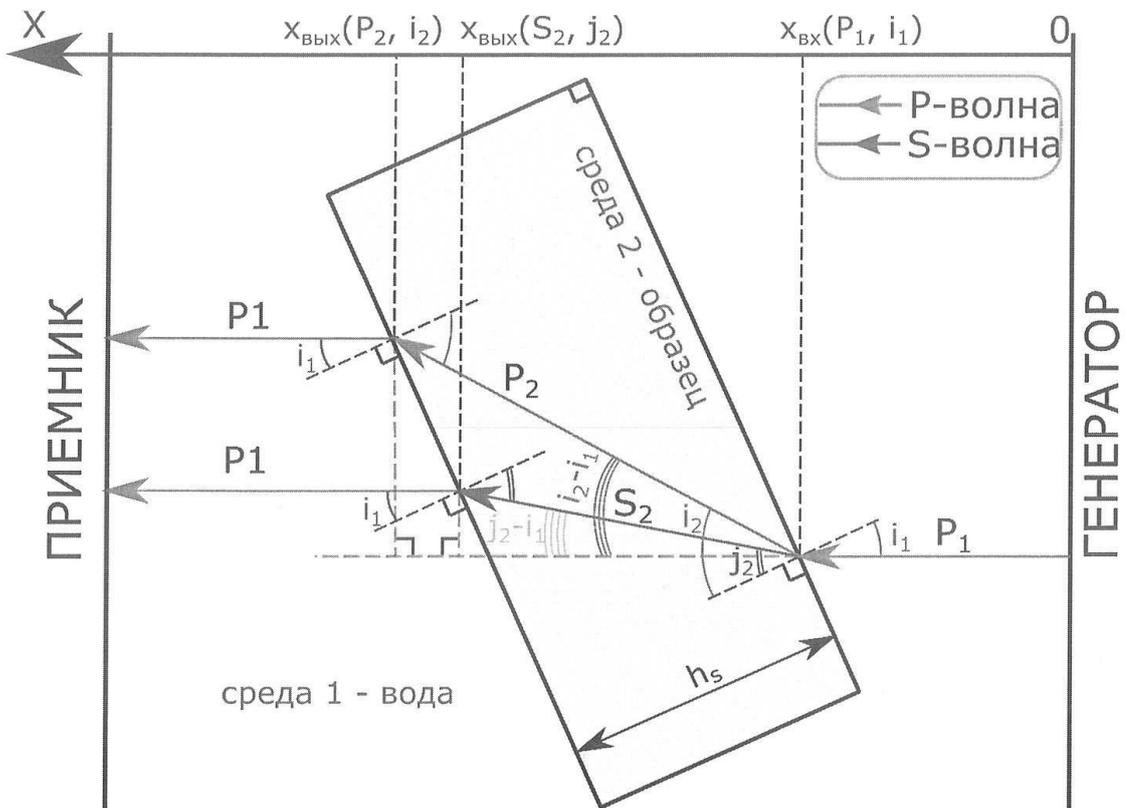


Рисунок 3 – Схема распространения волн в образце и кювете с водой установки Геоскан-02МУ

### 3.2. Обработка результатов экспериментов

#### 3.2.1 Расчёт значения скорости упругой продольной волны в воде

Алгоритм определения значения скорости упругой продольной волны в воде был следующим:

1. Генератор находится в статичном положении при всех регистрациях волновых форм с помощью приемника, далее положение приемника  $h_i + h_0$  (рисунок 4) относительно границы кюветы (соответственно, и генератора тоже) увеличивали;

2. При каждом положении приемника регистрировалась волновая форма (таких волновых форм было зарегистрировано пять, они приведены на рисунке 4. А-Д. На рисунке 4,Е совмещены все временные формы сигналов при разных положениях приемника № 1, 2, 3, 4 и 5 в соответствии с рисунком 4. Ж);

3. Время  $T_i$  распространения волны при каждом относительном положении приемника  $h_i + h_0$  можно выразить как  $\frac{h_i+h_0}{c_w}$ , то есть  $\frac{h_i+h_0}{c_w} = T_i$ ,

4. Данное выражение легко выразить в виде линейной функции  $y = kx + b$ , а именно  $T_i + T_0 = \frac{1}{c_w} h_i$

5. Далее с помощью метода наименьших квадратов найдем значения  $k = 1/c_w$  (то есть скорость) и  $b = -T_0 = h_0/c_w$  (смещение).

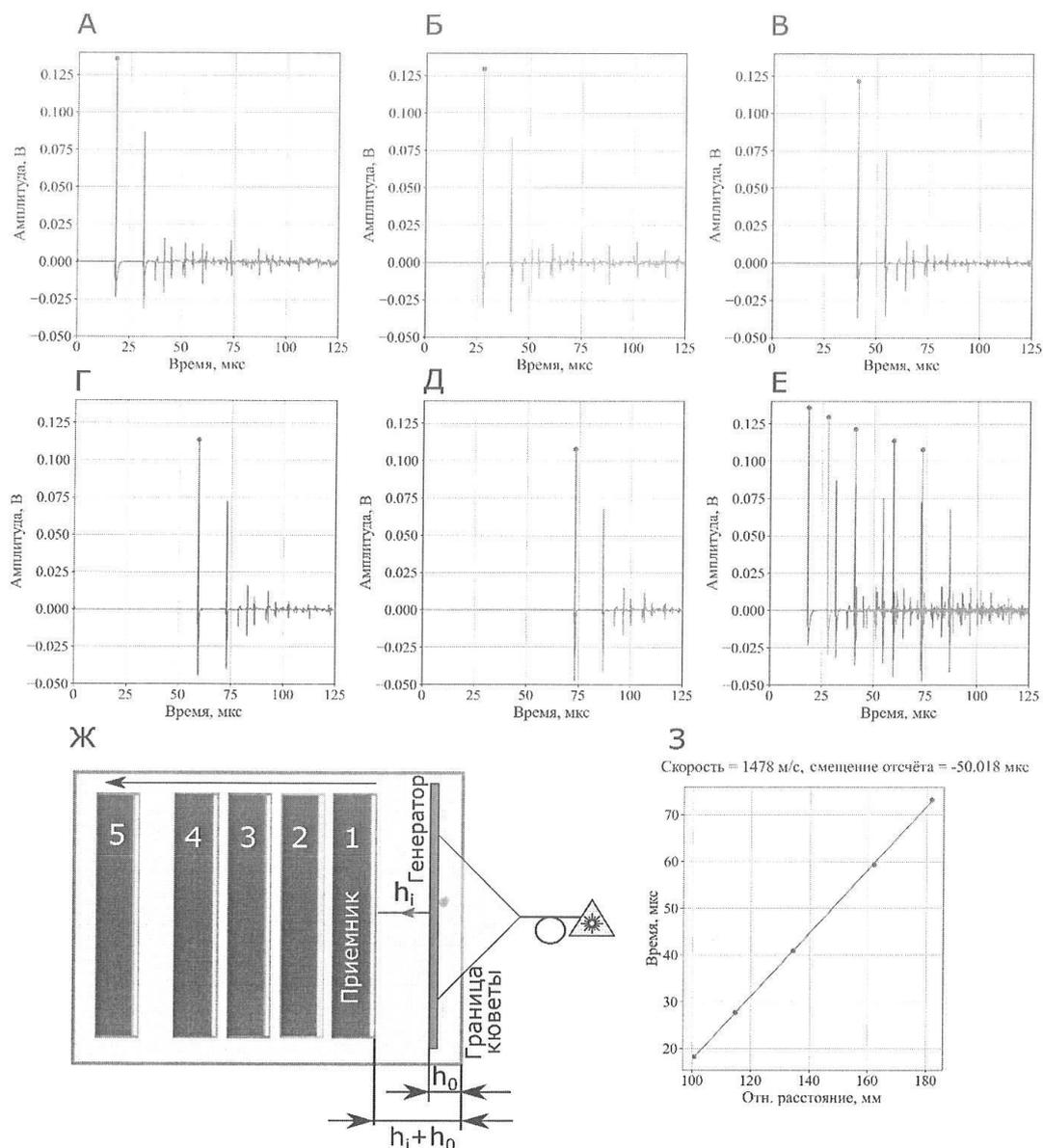


Рисунок 4 – Волновые формы сигналов без образца. А-Д- отдельно зарегистрированные импульсы продольной волны без образца, Е - волновые формы сигналов при разных положениях приемника № 1 – 5, представленных на схеме Ж. З – график зависимости времени регистрации импульса продольной волны приемником от его относительного положения

В соответствии со схемой, представленной на рисунке 3, были произведены простые математические операции, и выражено время прохождения волн как «Р [Р] Р», так и «Р [S] Р» в виде универсальной формулы:

$$T(i_1) = T_w + h_s \cdot c_w^{-1} ([c_w^2 \cdot c^{-2} - \sin^2(i_1)]^{1/2} - \cos(i_1)) \quad (1)$$

где  $c$  – скорость акустического импульса волны ( $P$  или  $S$ ) в образце толщиной  $h_s$ ,  $T_w$  – время распространения акустического импульса в иммерсионной жидкости без образца.

Скорости акустических упругих волн разного типа в образце необходимо рассчитывать методом наименьших квадратов на основе экспериментально определенных времен пробега  $T(i_1)$  с использованием (1)

Расчёт динамических упругих модулей образцов производится по формулам:

$$E_{dyn} = \rho C_t^2 \frac{3C_l^2 - 4C_t^2}{C_l^2 - C_t^2}, \quad (2)$$

$$\mu = \frac{C_l^2 - 2C_t^2}{2C_l^2 - 2C_t^2}, \quad (3)$$

$$G = \rho C_t^2, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность образца,  $\text{кг/м}^3$ ,  $E_{dyn}$  – динамический модуль упругости, ГПа,  $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $G$  – модуль сдвига.

Расчёт погрешности косвенного измерения производится согласно [4]. Важно отметить, что рассчитываемый параметр (динамический модуль упругости) по формуле (2) зависит от определенных значений скоростей и плотности, которые являются также косвенными измерениями.

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial C_l} \cdot \Delta C_l\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial C_t} \cdot \Delta C_t\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \rho} \cdot \Delta \rho\right)^2}, \quad (5)$$

$$\text{где} \quad \frac{\partial E}{\partial C_t} = -\frac{8C_t^3 \rho}{C_l^2 - C_t^2} + \frac{2C_t(3C_l^2 - 4C_t^2)\rho}{C_l^2 - C_t^2} + \frac{2C_t^3(3C_l^2 - 4C_t^2)\rho}{(C_l^2 - C_t^2)^2}, \quad \frac{\partial E}{\partial C_l} = \frac{6C_l C_t^2 \rho}{C_l^2 - C_t^2} - \frac{2C_l C_t^2(3C_l^2 - 4C_t^2)\rho}{(C_l^2 - C_t^2)^2} \text{ и } \frac{\partial E}{\partial \rho} = \frac{C_t^4(3C_l^2 - 4C_t^2)^2}{(C_l^2 - C_t^2)^2}$$

#### 4. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ УДЛ-2М И ПРИНЦИП ЕЕ РАБОТЫ

Принцип работы лазерной ультразвуковой установки УДЛ-2М представлен на схеме (рисунок 5). Короткий наносекундный лазерный импульс, который, попадая в специальный оптико-акустический генератор, возбуждает в нем ультразвуковой импульс продольной волны со строго контролируемой формой, длительностью порядка 80 нс и амплитудой давления до 0,1 МПа [5].

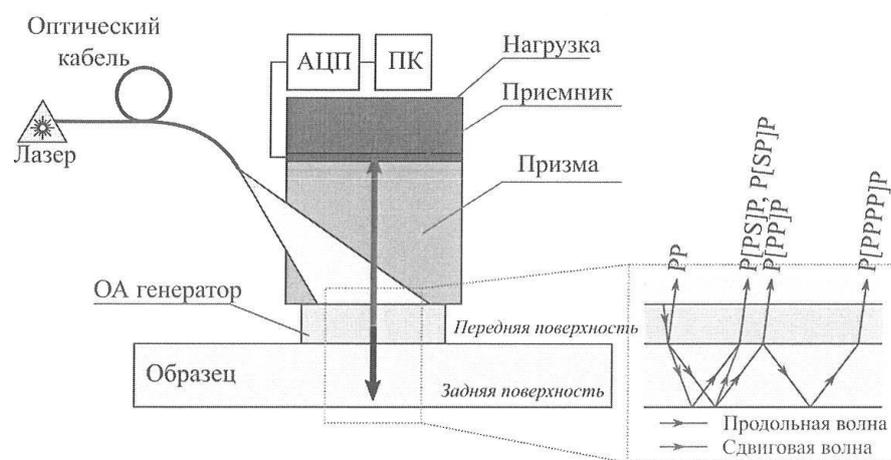


Рисунок 1 – Схема эксперимента в режиме эхо-импульсов и хода акустических волн в нём (а – схема ПЭП в процессе эксперимента, б – схема распространения и типов отражённых волн)

##### 4.1 Определение скоростей упругих волн с помощью эхо-метода

Определение скоростей упругих волн с помощью эхо-метода в соответствии с пунктом 6.5 Руководства по эксплуатации лазерного ультразвукового дефектоскопа [6].

4.2 Определение скоростей упругих волн с помощью оптимизационного эхо-метода

Алгоритм расчёта временной формы сигнала и определения по ней значений скоростей упругих волн представлен в таблице ниже.

№	Шаг	Задачи и операции
1	Считывание файла экспериментального сигнала	Считывание файла с экспериментальным сигналом
2	Обработка сигнала	Фильтрация сигнала с помощью супергауссовского фильтра нижних частот с частотой среза 20 МГц
3	Анализ и разметка экспериментального сигнала	Выделение интервалов времени, в которые попадают импульсы «PP», «P[PP]P», «P[PS]P+ P[SP]P» и «P[PPPP]P» волн. Определение положений максимумов для «PP» и «P[PS]P+ P[SP]P» волн и минимумов для «P[PP]P» и «P[PPPP]P» волн. Расчёт значений $c_l$ и $c_t$ в исследуемой среде 2 на основе найденных положений максимумов и минимумов.
4	Подбор параметров среды 1	Подбор параметров генератора и призмы (плотность, скорости, толщина), длительность лазерного импульса, радиус пучка, коэффициент поглощения света в генераторе так, чтобы импульсы «P» и «PP» волн совпали с экспериментальными. Подбор параметров среды 1 достаточно сделать один раз, если используется один и тот же преобразователь для исследования всех последующих образцов.
5	Уточнение значений $c_l$ и $c_t$ в исследуемой среде 2	Уточнение осуществляется с помощью алгоритма минимизации Нелдера-Мида. Итерационно минимизируются отклонения положений максимумов для «PP» и «P[PS]P+ P[SP]P» волн и минимумов для «P[PP]P» и «P[PPPP]P» волн в экспериментальном сигнале и модельном сигнале, рассчитанном по формулам 2.8, 2.17 и 2.18. В качестве начального приближения используются значения $c_l$ и $c_t$ , найденные на этапе 3.

## 5. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gusev V.E., Karabutov A.A. Laser Optoacoustics. – American Institute of Physics New York : AIP Press, 1993. – 296 P.
2. Cherepetskaya E.B, Karabutov A.A., Makarov V.A., Mironova E.A., *Shibaev I.A.*, Vysotin N.G., Morozov D. Internal Structure Research of Shungite by Broadband Ultrasonic Spectroscopy // Key Materials Engineering, 2017, Vol. 755, PP. 242-247, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.242
3. *Shibaev I.A.*, Morozov D.V., Dudchenko O.L., Pavlov I.A. Estimation of local elastic moduli of carbon-containing materials by laser ultrasound // Key Materials Engineering, 2018, Vol. 769, PP. 96-101, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.769.96
4. И.В. Митин, В.С. Русаков, Анализ и обработка экспериментальных данных, Москва, Физический факультет МГУ, Методические материалы, 2004, 45 страниц
5. Cherepetskaya E. B., Inkov V. N., Experimental study of nonlinear distortion of the form of powerful ultrasonic pulses during their propagation in rocks // Mining Informational and Analytical Bulletin, Volume 2005, Issue 2
6. Руководство по эксплуатации лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ 2М. Москва. 2013.