

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



Шibaев 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»**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Черепецкая Е.Б.

Москва, 2021

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 свойств, 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 при механических испытаниях в результате интерпретации зависимостей напряжения от деформации. Определяемые таким методом модули называют статическими.

Важно заметить, что не всегда удается 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.

Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов РФФИ №19-35-90063 «Исследование динамики поврежденности геоматериалов под влиянием механических воздействий на основе комплекса ультразвуковых методов геоконтроля», гранта РНФ № 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.

Основная идея работы заключается в установлении закономерностей генерации и распространения через исследуемый образец упругих волн различных типов, возникающих при нормальном падении широкополосных ультразвуковых пучков с гауссовым распределением амплитуды давления по поперечному сечению на границы раздела «твердое тело-геоматериал», для расчёта динамических модулей упругости геоматериала на основе прецизионного измерения скоростей этих волн.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ методов определения модулей упругости образцов горных пород.
2. Обоснована генерация 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. Разработана аналитическая 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. Разработан оптимизационный алгоритм расчёта значений скоростей упругих волн на основе модельной временной формы сигнала, провести его верификацию и апробацию на модельных образцах.
5. Проведены лабораторные испытания разномасштабных образцов горных пород различного генотипа для определения динамических модулей упругости с помощью оптимизационного алгоритма и использования комплексного метода лазерной ультразвуковой диагностики.

- б. Разработана методика определения динамических модулей упругости на основе прецизионного измерения скоростей упругих волн комплексным методом лазерной ультразвуковой диагностики.

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.

Основные научные положения и их новизна.

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) позволяют 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%.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- представительным объемом экспериментальных исследований, проведенных на образцах горных пород разного генотипа;
- непротиворечивостью полученных результатов общим законам физики, теории упругости, акустики и теории волн;
- применением в экспериментах комплекса хорошо зарекомендовавших методов, актуальных методик, высокоточного измерительного и испытательного оборудования, позволяющего получать достоверные результаты;
- удовлетворительной сходимостью результатов рассчитанных динамических модулей упругости, полученных с помощью установок лазерной ультразвуковой диагностики, работающих как в режиме проходящих волн, так и эхо-режиме;

Научная значимость 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 с повышенной точностью.

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.

Прикладное значение заключается в возможности определения динамических модулей упругости на образцах малых размеров в условиях ограниченного количества геологического материала.

Апробация работы.

Основные положения и 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, ЮМЗ, Великобритания, онлайн).

Публикации.

По теме исследования опубликовано 9 научных работ, из них 9 в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ и индексируемых наукометрической базой Scopus. Получены один патент РФ и одно свидетельство о регистрации программы ЭВМ.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований динамических и статических упругих характеристик образцов горных пород и приведен обзор методов их измерений.

К разрушающим методам относятся, в первую очередь, механические испытания, в которых по результатам интерпретации деформационных кривых определяют статический модуль упругости, коэффициент Пуассона. Однако не всегда удается определить данные упругие характеристики на керновом материале в связи с его нарушенностью. Тогда для определения модулей упругости на малых образцах применяют такие неразрушающие методы, как рентгеновская томография и микроиндентирование.

Однако, перечисленные выше методы позволяют получить лишь оценочные значения статических модулей упругости, особенно если речь идет о таких гетерогенных средах, как горные породы.

Несмотря на существенные физические различия статических и динамических модулей упругости (ДМУ), часто при отсутствии достаточного количества керна определяют только ДМУ. Расчёт ДМУ проводят на основе измерения скоростей упругих волн двух типов, которые для корректного восстановления упругих характеристик необходимо измерять с малой погрешностью, что затруднительно при использовании традиционных ультразвуковых методов.

Поэтому, как показано в работах последних лет, перспективным методом определения скоростей продольных и сдвиговых волн является лазерно-ультразвуковая диагностика (ЛУД). Однако проведенный анализ публикаций по лазерной ультразвуковой диагностике показал, что для корректного определения скоростей упругих волн и восстановлению по ним ДМУ необходимы аналитические методы расчёта временных форм регистрируемых лазерно-ультразвуковых сигналов. По этой причине разработка аналитических методов расчёта временных форм с учетом дисперсии фазовой скорости широкополосных оптико-акустических сигналов, а также верификация разработанных методов являются основными задачами данного исследования.

Вторая глава посвящена исследованию закономерностей генерации и распространения акустической сдвиговой волны, возникающей при нормальном падении продольной волны с гауссовым распределением амплитуды смещения по поперечному сечению, на границы раздела различных изотропных сред, а также теоретическому расчёту ее параметров.

Для выполнения данной задачи была рассмотрена модель распространения продольной (P) и сдвиговой (S) волн, возникающих при преломлении и отражении продольной волны с ограниченной апертурой на границах раздела твердых сред, графически представленная на рисунке 1.

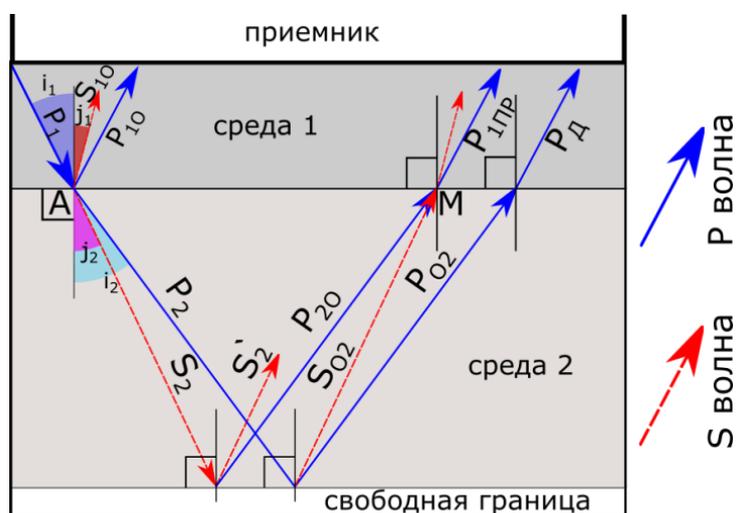


Рисунок 1 – Модель распространения продольной (P) и сдвиговой (S) волн, возникающих при преломлении и отражении продольной волны с ограниченной апертурой на границах раздела твердых сред

Пусть среда 1 – изотропное твердое тело (среда лазерно-ультразвукового преобразователя), в котором сформировалась продольная волна с близким к гауссовому распределением амплитуды давления частиц по поперечному сечению, а среда 2 – это среда исследуемого образца, ограниченная снизу свободной плоской поверхностью (граница «образец-воздух»). Верхняя граница среды 1 совмещена с широкополосным пьезоприемником.

Поскольку апертура падающего акустического пучка продольной волны ограничена, то в его угловом спектре присутствуют некоторые малые углы падения, отличные от нуля. Обозначим i_1 и i_2 углы, под которыми распространяются продольные волны в соответствующей среде, j_1 и j_2 – углы распространения сдвиговых волн (рис. 1,

где для наглядности все углы изображены в увеличенном масштабе). Также обозначим через ρ_1, c_{l1}, c_{t1} и ρ_2, c_{l2}, c_{t2} – плотности и скорости продольных и сдвиговых волн в средах 1 и 2.

Рассмотрим продольную волну P_1 , падающую из изотропного твердого тела (точка А) в исследуемый образец под некоторым углом i_1 (рисунок 1). На границе раздела сред 1-2 возникают две отраженные волны: продольная P_{10} , которая в дальнейшем служит опорным сигналом, и сдвиговая S_{10} , которая дополнительной информации не несет и не рассматривается. На этой же границе раздела возникают две преломленные в среду 2 волны: продольная P_2 , распространяющаяся под углом i_2 и сдвиговая S_2 с углом преломления j_2 . При отражении волны P_2 от свободной границы образца появляются также две волны: отраженная продольная P_{02} и сдвиговая S_{02} (рисунок 1). Волна P_{02} , преломляясь на границе «2-1», приводит к продольной волне P_d , которая при регистрации пьезоприемником создает сигнал, отраженный от свободной поверхности образца и вносит вклад в первый донный импульс.

Время его задержки относительно опорного сигнала равно времени двойного пробега по толщине образца, и по нему рассчитывается скорость продольной волны.

Рассмотрим из оставшихся волн только те волны, при использовании которых может быть рассчитана скорость сдвиговой волны. Первая из них S_2 (рисунок 1) при отражении от свободной границы образца частично трансформируется в продольную волну P_{20} . Вторая S_{02} , возникающая в результате трансформации мод при отражении волны P_2 от свободной границы образца, регистрируется как продольная после прохождения границы образец (среда 2) – изотропное тело (среда 1). Особенности двух описанных выше волн заключаются в том, что путь h_s (h_s – толщина образца) внутри образца они распространялись как сдвиговые, и такой же путь как продольные (рисунок 1). Две данные волны приходят в одну и ту же точку (на рисунке 1 это точка М) синфазно и, складываясь, дают волну $P_{1пр}$. При этом время задержки T этих волн относительно опорного сигнала одинаково и составляет:

$$T = h_s/c_{l2} + h_s/c_{t2} \quad (1)$$

Для каждой компоненты углового спектра пространственного Фурье-преобразования падающей волны P_1 были получены выражения для соответствующего

смещения частиц в описанных выше волнах при их преобразовании ($P_1 \rightarrow S_2 \rightarrow P_{20} \rightarrow P_{1np}$ – для первой и для второй – $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow S_{02} \rightarrow P_{1np}$).

Через произведение коэффициентов прохождения ($W_{P_1P_2}, W_{P_{20}P_{1np}}$), отражения ($W_{P_2S_{02}}, W_{S_2P_{20}}$) и трансформации ($W_{S_{02}P_{1np}}, W_{P_1S_2}$) были рассчитаны амплитудные коэффициенты для каждого угла падения имели вид:

$$W_{P_1P_2} \cdot W_{P_2S_{02}} \cdot W_{S_{02}P_{1np}} = W_{P_1S_2} \cdot W_{S_2P_{20}} \cdot W_{P_{20}P_{1np}} = -16\rho_2\rho_1 \frac{\cos i_2 \cos i_1 \cos j_2}{v_{t2} v_{l1} v_{t2}} \left(\frac{1}{v_{t2}^2} - 2p^2 \right) \frac{FGp^2}{D^2 D_2^F}, \quad (2)$$

Коэффициенты (2) имели одно и то же значение для каждой из двух волн. В выражении (2) F, G, D, D_2^F определяются характеристиками сред 1 и 2, p – лучевой параметр, равный отношению синуса соответствующего угла к скорости распространения волны.

Далее были выполнены аналитические расчёты для проекции колебательной скорости частиц \tilde{V}_z каждого типа волн и получены следующие выражения:

$$V_{z,m}(t, r_{\perp}, z) \approx I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{f}(\omega) \mathcal{G}_m(\omega, r_{\perp}, z) e^{-i\omega(t-\tau_m)} \frac{d\omega}{2\pi} \quad (3)$$

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

В формулах (3) – (4) введены следующие обозначения: m – идентификатор типа волн (P или S), I_0 – пиковое значение интенсивности лазерного импульса в материале генератора (среда 1, рисунок 1), $\tilde{f}(\omega)$ – Фурье-образ временной огибающей интенсивности лазерного импульса, $r_{\perp} = \sqrt{x^2 + y^2}$, a – ширина падающего акустического пучка, $\mathcal{K}_m^{(0)}$ и $\mathcal{K}_m^{(2)}$ – разложения по малым значениям лучевого параметра p , соответственно, нулевого и второго порядков передаточной функции соответствующей среды, q_m – дифракционный параметр для каждого типа волн m , зависящий от координаты z , $W_m^{(0)}$ и $W_m^{(2)}$ – первые два члена разложения по p коэффициентов отражения преломления и трансформации, τ_m – временная задержка волн различных типов.

На рисунке 2 представлены рассчитанные по формулам (3), (4) аналитические временные формы сигналов для образцов дюралюминия и доломита.

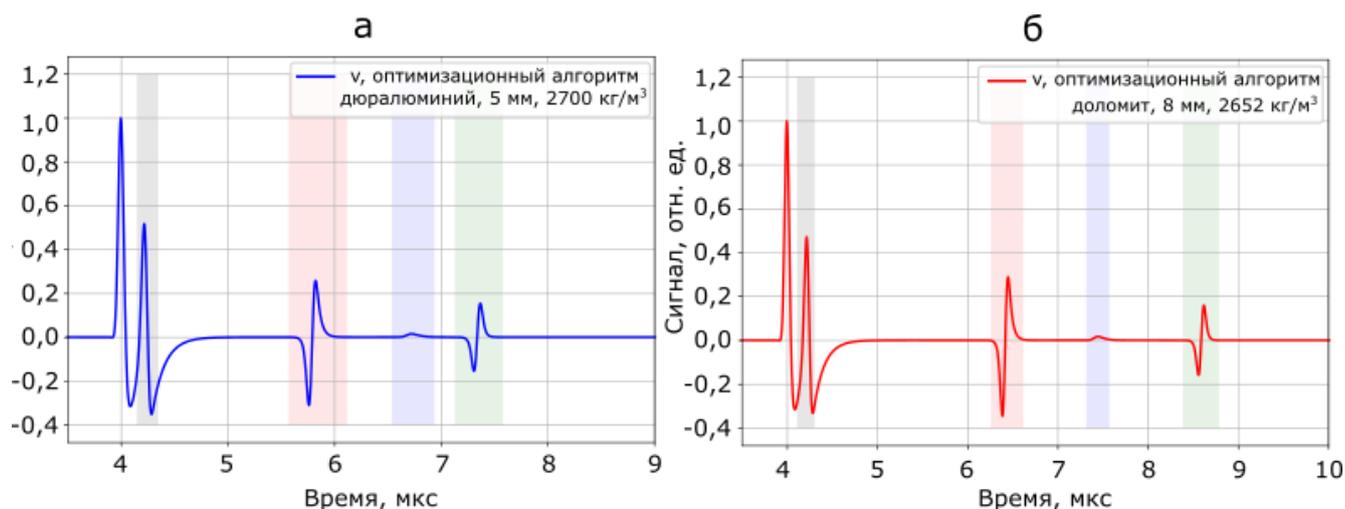


Рисунок 2 – Модельные временные формы сигналов, рассчитанные с помощью оптимизационного алгоритма (а) дюралюминий и (б) доломит

Верификация оптимизационного алгоритма расчёта скоростей упругих волн (оптимизационный эхо-метод) на основе выведенных выражений (3-4) проводилась в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Методом конечных элементов был рассчитан временной профиль ультразвуковых импульсов в модельной задаче. Было установлено качественное и количественное совпадение результатов конечно-элементного моделирования и разработанной аналитической модели.

Таким образом, выполненные исследования позволили:

1) обосновать возможность генерации сдвиговых волн при нормальном падении на границу раздела изотропных твердых тел и свободную границу акустических пучков продольных волн с гауссовым распределением амплитуды смещения и рассчитать амплитудные коэффициенты преобразования упругих волн для каждой компоненты углового спектра пространственного Фурье-преобразования падающей продольной волны;

2) получить аналитические выражения для каждого значения лучевого параметра, необходимые для дальнейших расчётов временной формы сигнала для определения скоростей волн;

3) разработать *оптимизационный алгоритм расчёта значений скоростей упругих волн на основе модельной временной формы сигнала (оптимизационный эхо-метод)*;

4) провести верификацию модельного сигнала, построенного с помощью оптимизационного алгоритма с модельным сигналом, рассчитанным в COMSOL

Multiphysics и установить, что данные сигналы имеют качественное и количественное совпадение.

В третьей главе представлены: результаты валидации оптимизационного эхо-метода на модельных образцах, алгоритм определения скоростей волн с помощью теневого иммерсионного режима лазерной ультразвуковой диагностики и метод определения динамических модулей упругости образцов различных материалов.

С целью апробации разработанного оптимизационного эхо-метода были подготовлены модельные образцы стекла и дюралюминия. Данные образцы первоначально исследовались с помощью эхо-режима ЛУД, а потом, с целью дополнительной верификации полученных значений скоростей упругих волн в них, использовался теневой режим ЛУД.

Реализация эхо-режима проводилась с использованием лазерного ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М. На рисунке 3 представлено сравнение экспериментальных (полученных эхо-методом) и рассчитанных с помощью оптимизационного алгоритма временных форм сигнала для данных образцов.

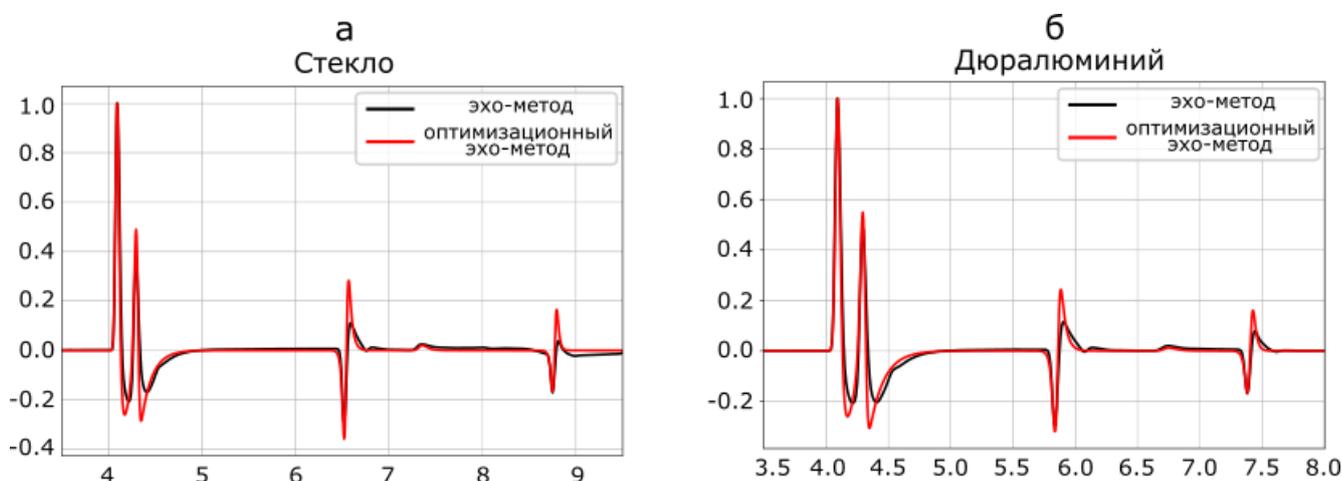


Рисунок 3 – Экспериментальные временные формы сигнала, полученные на модельных образцах с помощью эхо-метода и оптимизационного эхо-метода (а - стекло, б – дюралюминий)

Удовлетворительное совпадение данных временных форм сигналов свидетельствует о возможности использования оптимизационного эхо-метода для прецизионного измерения скоростей продольных и сдвиговых волн.

Также полученные значения скоростей дополнительно верифицировались с использованием лазерной ультразвуковой установки Геоскан-02МУ, работающей в теновом иммерсионном режиме. Данная установка была предварительно автоматизирована в связи с необходимостью проведения большого количества испытаний. Был установлен шаговый двигатель на поворотную ось зажимного устройства и написана программа для микроконтроллера, управляющего двигателем поворотной оси. Схема проведения исследования с использованием Геоскана-02МУ приведена на рисунке 4.

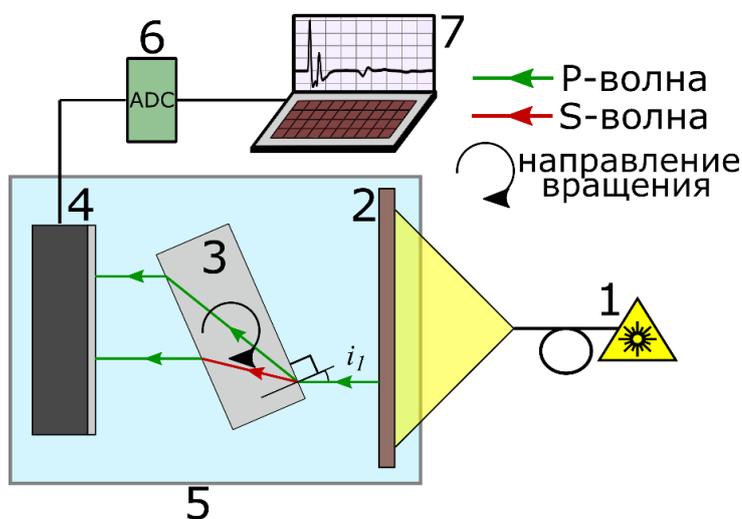


Рисунок 4 – Схема проведения исследования с использованием Геоскана-02МУ (1 – лазер, 2 – генератор, 3 – образец, закрепленный в зажимном устройстве поворотной оси, 4 – приемник, 5 – кювета с дистиллированной водой, 6 – АЦП, 7 – ПК)

Для нахождения скоростей продольных и сдвиговых волн в исследуемом образце в теновом режиме ЛУД экспериментально измерялись времена прихода $T(i_1)$ импульсов данных волн при различных углах падения i_1 из жидкости на образец.

Экспериментально полученная зависимость $T(i_1)$ аппроксимировалась видом, соответствующим выведенной теоретической зависимости $T(i_1)$:

$$T(i_1) = T_w + h_s \cdot c_w^{-1} [c_w^2 \cdot c^{-2} - \sin^2(i_1)]^{1/2} - \cos(i_1) \quad (6)$$

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,

i_1 – угол, под которым продольная акустическая волна падает из иммерсионной жидкости на поверхность образца.

Значения скоростей упругих волн в образце определялись с использованием метода наименьших квадратов и симплекс-метода Нелдера-Мида.

Разница в значениях скоростей продольных волн в модельных образцах, определенных с использованием двух эхо-методов и теневого метода, была в среднем 1,2%. Разница значений скоростей сдвиговых волн, определенная теньевым методом и оптимизационным эхо-методом, была наилучшей для модельного образца с наименьшим отклонением параллельности граней – и составила всего 1,4 %. Важно отметить, что оптимизационный метод определения скоростей сдвиговых волн показал лучшие результаты по сравнению с теньевым методом (разница составила до 2,8 %), в отличие от «классического» эхо-метода, где расхождение в значениях скоростей достигало 4,8%.

Также оптимизационный эхо-метод был протестирован на водонасыщенном образце известняка толщиной 3,1 мм. Результаты измерений и расчёта скоростей представлены на рисунке 5. Значения скоростей продольных и сдвиговых волн составили: $c_l = 4251 \pm 35$ м/с и $c_t = 2369 \pm 19$ м/с.

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.

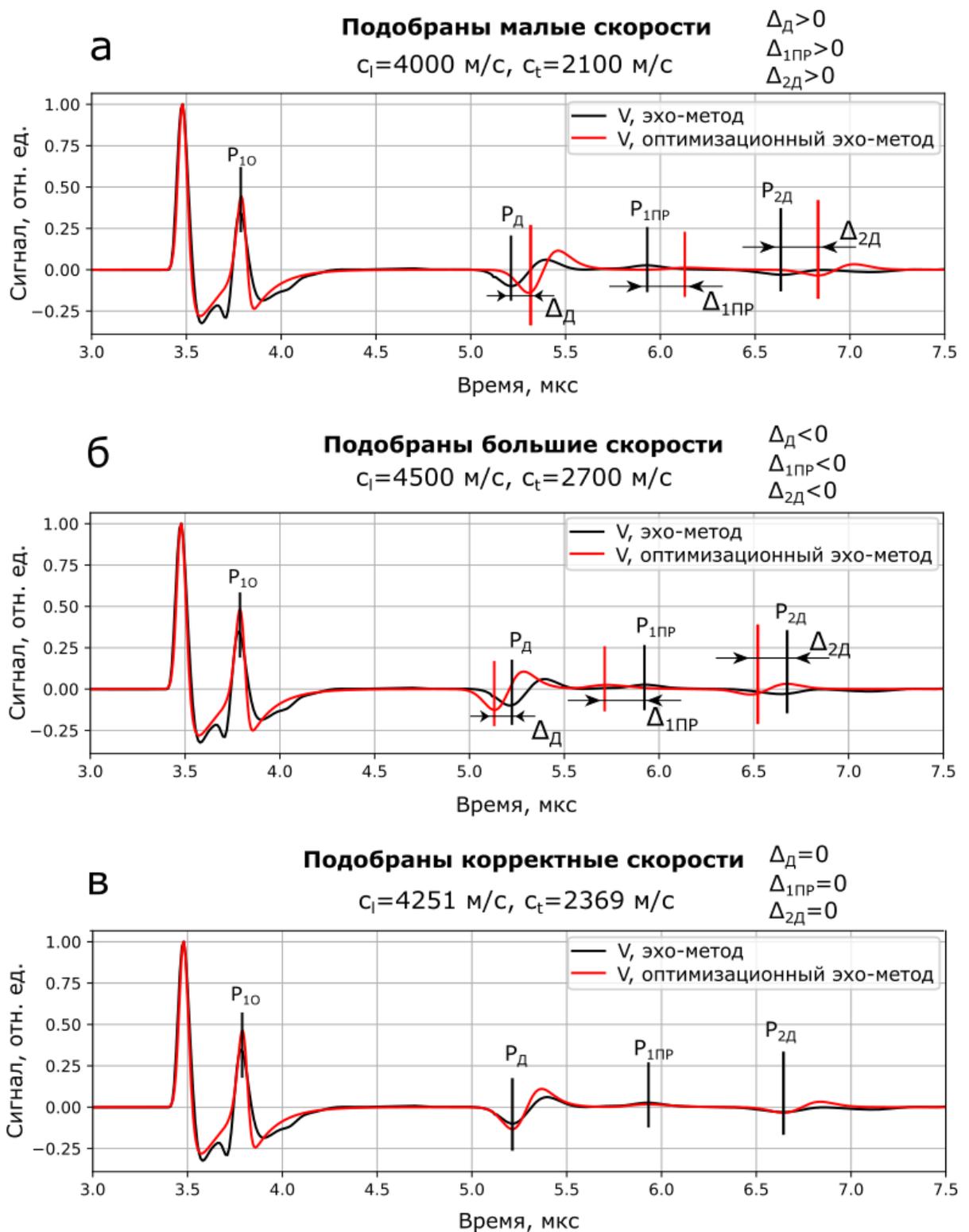


Рисунок 5 – Временные формы экспериментального и теоретического сигналов для образца из известняка (чёрная линия – результат эхо-метода, красная линия – результат оптимизированного эхо-метода)

Таким образом, были разработаны общие методические подходы к определению ДМУ различными методами ЛУД.

В четвертой главе приведены результаты экспериментов по определению значений скоростей упругих волн на основе разработанных алгоритмов и оценке ДМУ полноразмерных образцов горных пород разного генотипа и в образцах-пластинах, изготовленных из них. При этом решались следующие задачи: (1) апробация разработанного оптимизационного эхо-метода на образцах-пластинах горных пород, (2) обоснование возможности оценки ДМУ по образцу-пластине, подготовленного из некоего малого, структурно ненарушенного объема горной породы, с помощью различных методов ЛУД (с целью отработки оптимального комплексного метода).

Для исследования подготавливались полноразмерные (в соответствии с действующими нормативами) образцы пироксенитов, долеритов, аргиллитов, известняков, мраморов, шунгитов и гранитов. Все образцы обладали разными текстурно-структурными особенностями. Обобщенная схема проведения исследования представлена ниже (рисунок 6). Последовательность действий была следующей:

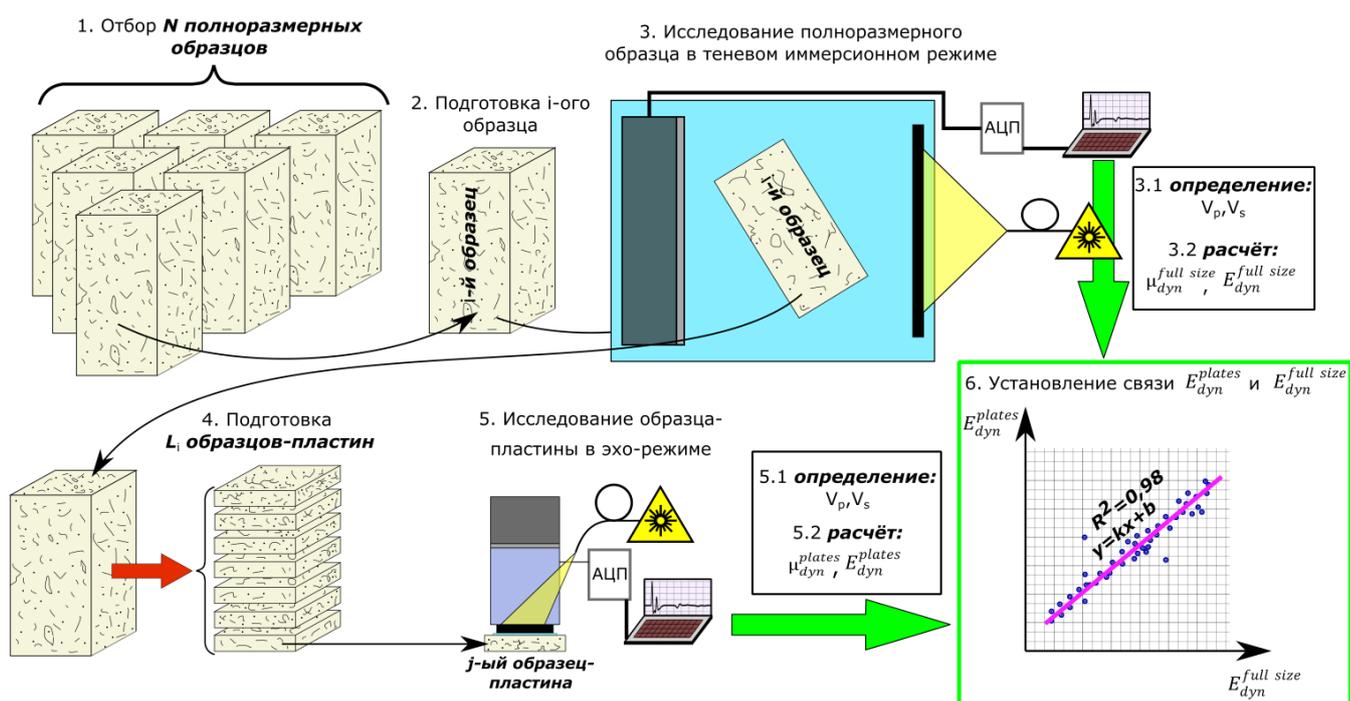


Рисунок 6 – Схема проведения оценки ДМУ разномасштабных образцов горных пород

1. Подготавливались полноразмерные образцы в виде прямоугольных параллелепипедов;

2. В каждом из подготовленных образцов определялись скорости распространения упругих волн с помощью теневого режима работы установки Геоскан-

02МУ. Полученные данные обрабатывались, рассчитывались динамические модули упругости образцов;

3. Каждый из полноразмерных образцов распиливался на группу образцов-пластин разной толщины. Важным условием данного этапа была подготовка плоскопараллельных пластин с низким значением относительной ошибки определения их толщины (менее 0,5 %);

4. В эхо-режиме ЛУД определились значения скоростей волн в каждом образце-пластине, соответствующем полноразмерному образцу. Для этого производилась обработка полученных временных форм сигналов, их фильтрация, расчёт локальных скоростей волн на основе временных задержек импульсов продольных и сдвиговых волн и с применением оптимизационного алгоритма и расчёт ДМУ образцов-пластин;

5. Последним этапом была общая обработка полученных данных, расчёт ДМУ разномасштабных образцов и установление их взаимосвязи.

В соответствии с ASTM 2845-05 для акустических исследований горных пород отбирались образцы акустически изотропные, в которых разница скоростей продольных акустических волн в трёх ориентациях образца не превышала 1,9 % от их среднего значения.

С помощью теневого иммерсионного режима ЛУД регистрировались времена прихода и временные формы сигналов P и S волн. Зависимость амплитуды упругих волн различных типов и времени их прихода от угла поворота образца для различных по толщине образцов гранита приведены на рисунке 7. По формуле (6) рассчитывались значения групповых скоростей упругих волн в образцах.

Важно отметить, что теневой метод позволяет определять акустические характеристики образцов с высоким затуханием и бóльшей толщиной, чем эхо-методы, а также за счёт регистрации сигналов при разных положениях образца учитывать разную ориентацию зерен и структурных элементов, слагающих исследуемую породу.

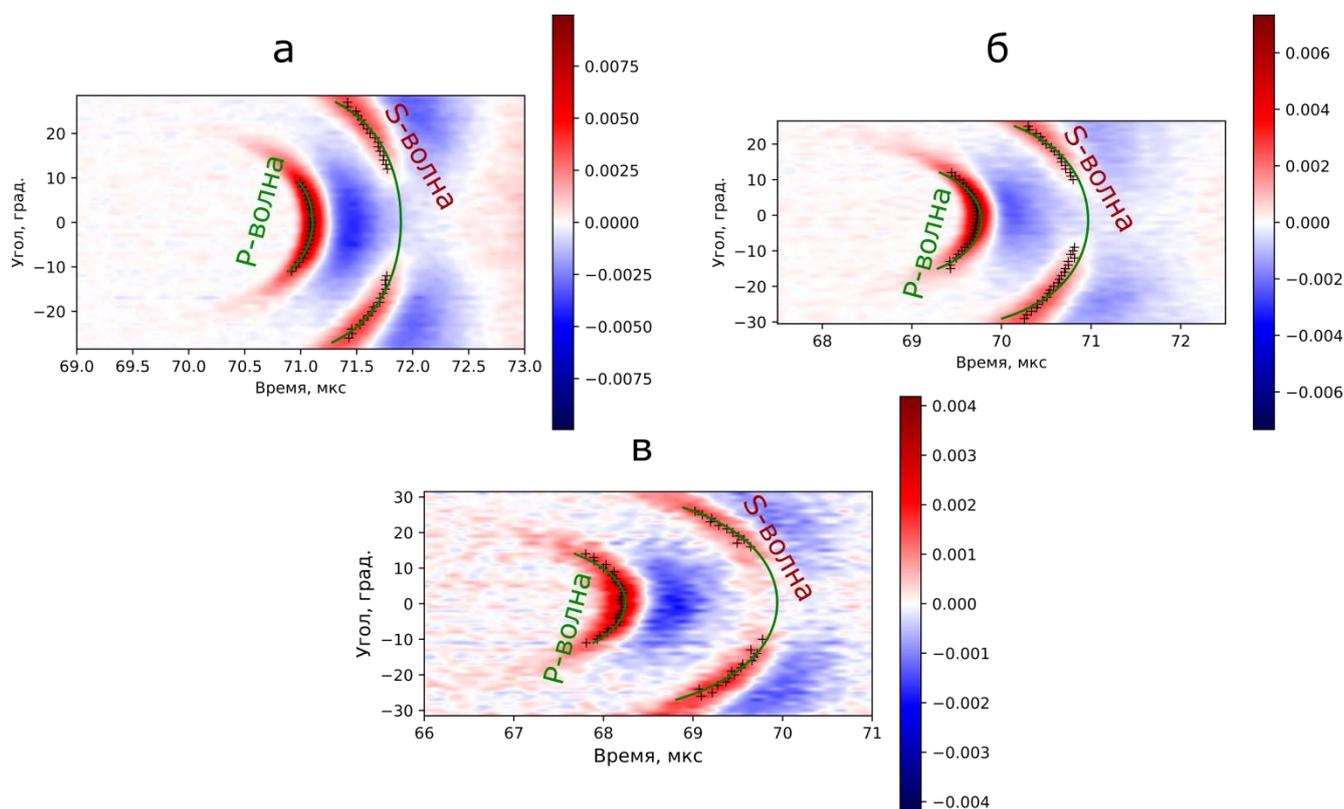


Рисунок 7 – Карты распределения амплитуды сигнала импульсов продольных и сдвиговых волн от времени распространения соответствующего импульса при разных углах падения в результате поворота образца гранита «Возрождение» толщиной 8,02 (А), 11,86 (Б) и 30,6 мм (B)

Следующим этапом работы было экспериментальное определение значений скоростей волн с помощью эхо-методов и оптимизационного эхо-метода на образцах-пластинах, подготовленных из ранее исследованных с помощью теневого метода полноразмерных образцов.

Ошибка определения значений скорости продольной упругой волны эхо-методом колебалась от 0,48 до 0,76%, при применении оптимизационного эхо-метода она составила от 0,27 до 0,54% а при теновом методе – от 0,28 до 0,57%.

Ошибка для сдвиговой волны в эхо-методе колебалась от 0,76 до 1,21%, при оптимизационном методе составила от 0,33 до 0,58%, а при теновом методе – 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.

Характерные волновые формы сигналов, полученные в различных точках по поверхности образца-пластины аргиллита толщиной 9,97 мм с помощью эхо-метода, представлены на рисунке 8.

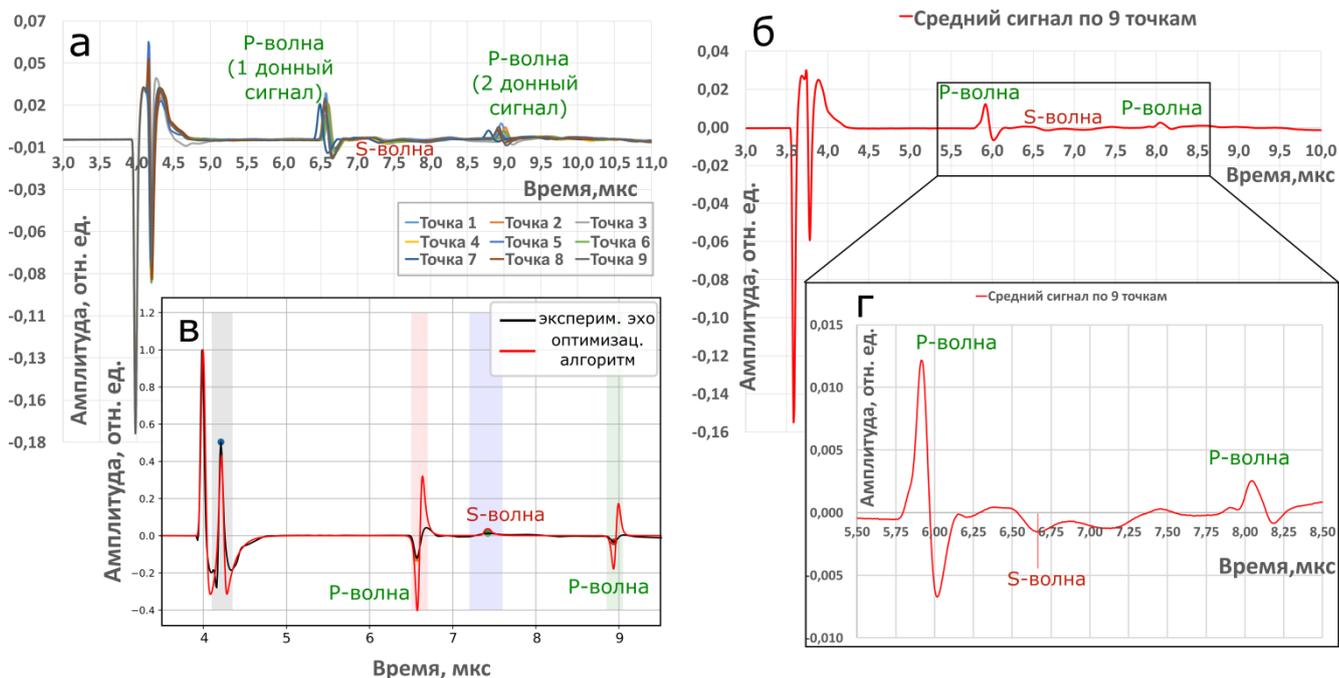


Рисунок 8 – Волновые формы (а – 9 волновых форм, полученных в разных 9 точках по площади образца, б – сумма сигналов с выраженными импульсами продольных и сдвиговой волны, в – расчёт временной формы сигнала с помощью оптимизационного алгоритма, г – увеличенная область регистрации импульсов волн)

На рисунке 8, А-Г отчетливо видны огибающие импульсов как P – волн (отражённой от дна образца один раз и двукратно), так и S – волны. Для таких волновых форм представлялось возможным использовать оптимизационный алгоритм расчёта значений скоростей упругих волн на основе модельной временной формы сигнала.

Из рисунка 8, В видно, что даже при совпадении максимумов и минимумов импульсов по волновым формам, полученных с использованием эхо- и оптимизационного эхо-методов, значения скоростей отличаются в среднем на 2%. Данная погрешность вызвана различными происходящими оптоакустическими явлениями, связанными с контактом «преобразователь-образец» (прижим недостаточной силы), наличием слоя воды при контакте (недостаточный или избыточный) и другими факторами влияния. Таким образом, разработанный оптимизационный эхо-метод значительно компенсирует данные факторы влияния на получаемые результаты.

Волновые формы без структурных шумовых помех и ревербераций наблюдались при ЛУД как на образцах аргиллита, так и на образцах мрамора, известняка, долерита и

шунгита. Данные образцы объединяет их текстурно-структурная схожесть и низкая пористость.

Однако для крупнозернистых пород с большим затуханием в них (таких, как граниты) по полученной временной форме сигналов оказалось невозможным определение скорости упругих волн. Поэтому образцы-пластины горных пород с явно выраженной зернистостью и высоким значением затухания исследовались с помощью теневого иммерсионного метода.

Значения, полученные по вышеприведенным алгоритмам, являются значениями «групповых» скоростей волн, определенных по максимуму и минимуму импульса соответственно для продольных и сдвиговых волн.

Для корректного сравнения скоростей волн на разномасштабных образцах необходимо оценить дисперсию фазовой скорости и определить, в каких частотных диапазонах фазовая и групповая скорости совпадают. Алгоритм расчёта дисперсионных кривых представлен на рисунке 9 для образца мрамора толщиной 40 мм.

Измерения теньевым методом были проведены для всех полноразмерных образцов горных пород и образцов-пластин зернистых горных пород (граниты, пироксениты). По результатам анализа построенных дисперсионных кривых были выделены несколько частотных диапазонов, в которых наблюдается резкое изменение значения скорости и ее стабилизация.

Как показали массовые испытания, разброс скоростей для большинства образцов горных пород в диапазоне 100–500 кГц составляет 5-15%, в то время, как при частотах 0,5–3 МГц этот разброс становится менее 1%.

Для объяснения полученных результатов была использована связь групповой C_{gr} и фазовой $C(\omega)$ скоростей

$$C_{gr} = \frac{d\omega}{dk}, \quad (7)$$

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

Mrb 5.1

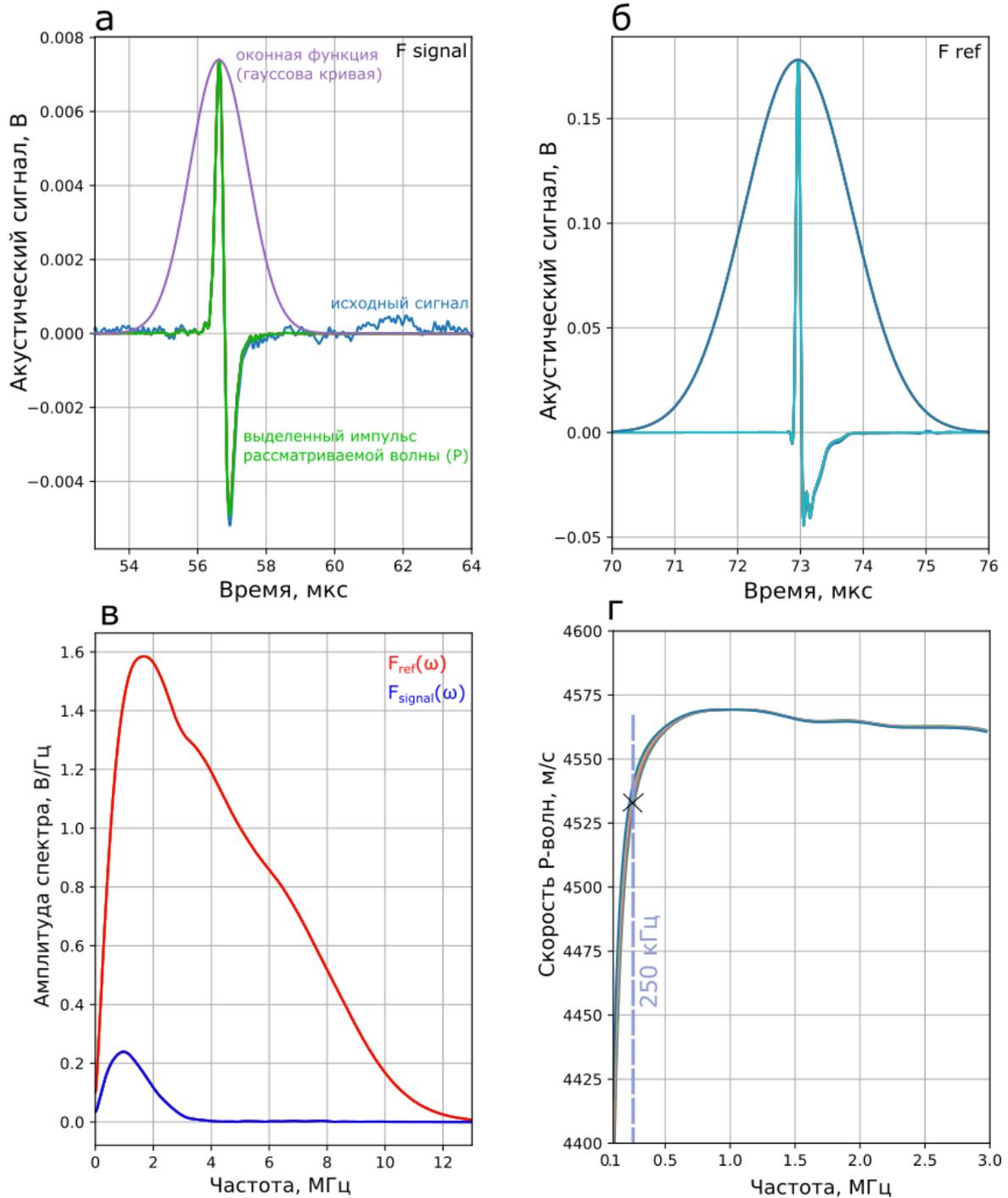


Рисунок 9 – Пример типовой обработки сигнала, полученного на полноразмерном образце мрамора (Mrb 5.1) с помощью теневого метода. А – Сигнал импульса (в данном случае) P – волны при определенном угле поворота образца (в данном случае, при 0°) с построенной оконной функцией, Б – исходный, отфильтрованный 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

Выражая групповую скорость через фазовую скорость $C(\omega)$ для каждой гармоники, получим соотношение:

$$C_{gr} = \frac{1}{dk/d\omega} = \frac{1}{\frac{1}{C(\omega)} \frac{C'(\omega)}{C^2(\omega)} \omega} \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что в области, где $C'(\omega) = 0$ или $C(\omega) = const$, фазовая и групповая скорости продольных волн совпадают $C_{gr} = C(\omega)$.

Практически для всех образцов горных пород различных генетических типов в частотном диапазоне 0,5–3 МГц $C'(\omega) = 0$. Это означает, что для корректировки групповой скорости, измеряемой в эхо-режиме на установке УДЛ-2М, необходимо выставлять фильтр в соответствии с вышеопределенным диапазоном.

Оказалось, что полученные таким образом скорости в эхо-режиме отличаются от скорости, измеренных теневым методом в пластинах и полноразмерных образцах, менее чем на 1 %.

Для анализа ДМУ, определенных различными методами, были введены следующие обозначения: $E(C_{f_{X-YMHz}})_{plates}^{dyn. T-mode}$ – ДМУ образцов-пластин (plates) или полноразмерных образцов (full-size sample), рассчитанный по значениям скоростей волн разных типов, определенных по дисперсионным кривым в диапазоне частот 0,5–3 МГц с помощью 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 эхо-метода с применением фильтра 0,5-3 МГц.

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

Также важно отметить, что относительная ошибка ДМУ по образцам-пластинам доходила до 1,7%, по полноразмерным образцам – до 0,8%.

При проведении аппроксимации полученных данных линейной функцией $E(C_{f_{1-4MHz}})_{full.size}^{dyn. T-mode} = 0,93E(C_{gr})_{plates}^{dyn. R-mode (opt)} + 3,19$ коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,78$, это указывает на сильную тесноту корреляционной связи ДМУ, определенных на разномасштабных образцах горных пород.

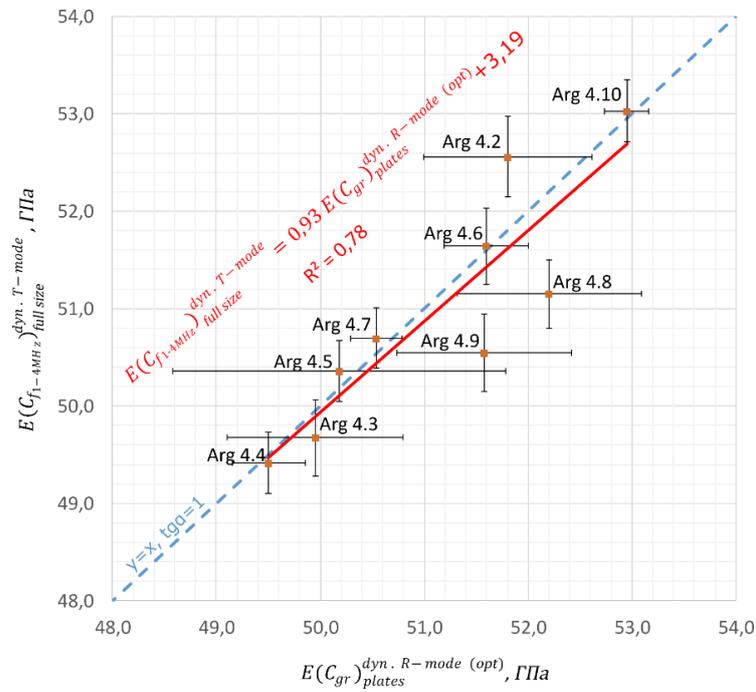


Рисунок 10 – Связь значений ДМУ образцов-пластин и полноразмерных образцов аргиллита

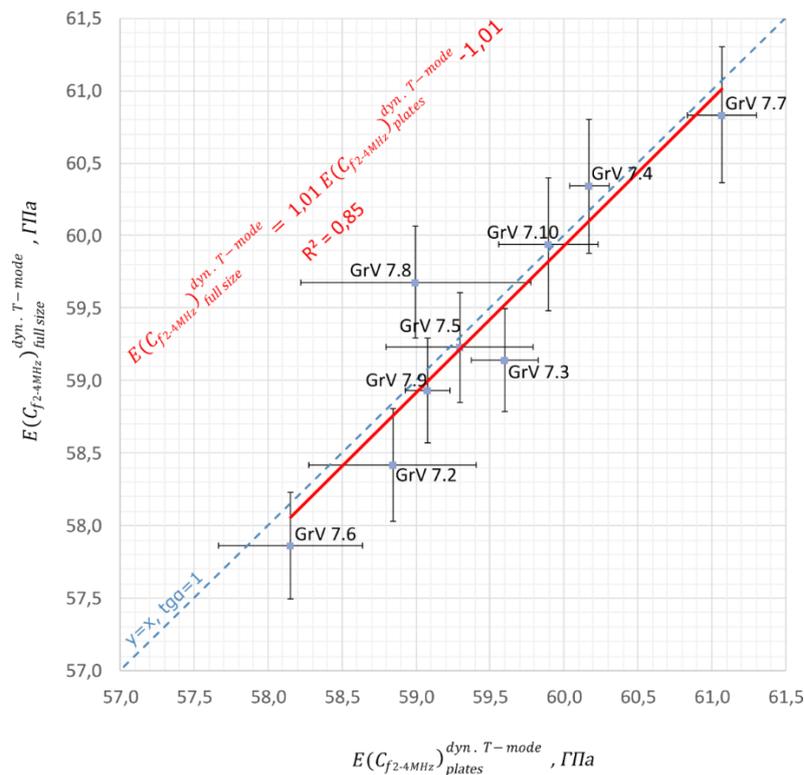


Рисунок 11 – Связь значений ДМУ образцов-пластин и полноразмерных образцов гранита

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

Как видно из графика рис. 10, незначительные отличия (порядка 0,1 ГПа) значений ДМУ полноразмерных образцов и подготовленных из них образцов-пластин наблюдались в образцах Arg 4.4, Arg 4.7, Arg 4.6 и Arg 4.10.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что ДМУ полноразмерного образца аргиллита численно равен среднему значению ДМУ образцов-пластин аргиллита, подготовленных из него.

Стоит отметить, что все полноразмерные образцы гранитов обладали практически равным (около 0,5 ГПа) значением ошибки ДМУ. Наименьшие значения СКО (0,2 ГПа) были у образцов гранита толщиной порядка 18 мм (3-4-х кратное количество основных минеральных зерен, слагающих данную породу попадало в базу прозвучивания). Важно отметить, что ДМУ как полноразмерных, так и образцов-пластин гранитов определялись с помощью теневого иммерсионного режима. Для их расчёта использовались стабильные значения фазовых скоростей упругих волн в диапазоне 2–3 МГц, определенные по дисперсионным кривым. Аналогичные результаты были получены и на других образцах горных пород, исследуемых в рамках данной работы.

Таким образом было 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%.*

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. Найдены суммарные коэффициенты преобразования данных волн.

3. Получены аналитические выражения для различных значений лучевого параметра, необходимые в дальнейших расчётах 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. Разработан алгоритм определения скоростей упругих волн в теневом режиме с помощью автоматизированной лазерно-ультразвуковой установки «Геоскан-02МУ» и написаны программы обработки сигналов.

5. В результате измерений в теневом режиме получено, что для полноразмерных образцов (толщиной 30-40 мм и более) наблюдается сильная дисперсия фазовой скорости упругих волн за счёт дифракции и затухания в частотном диапазоне 0,1-0,5 МГц, что приводит к разбросу значений скорости до 15%, в то время, как для частот 0,5-3 МГц данный разброс менее 1%.

6. Показано, что в частотном диапазоне 0,5-3 МГц фазовая и групповая скорости упругих волн совпадают для полноразмерных образцов, а значения скоростей, измеренные на полноразмерных образцах и образцах-пластинах, как в теневом, так и в эхо режимах лазерной ультразвуковой диагностики, совпадают с точностью до 1,1%.

7. На базе результатов теоретических и экспериментальных исследований, численного моделирования разработана «Методика определения динамических модулей упругости разномасштабных образцов горных пород с использованием комплексного метода лазерной ультразвуковой диагностики».

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

Статьи, опубликованные в журналах из Перечня ВАК РФ и в изданиях, индексируемых международной базой 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 (Scopus).

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 (Scopus).

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 (Scopus).

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 (Scopus).

5. *Шубаев 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 (ВАК, Scopus).

6. *Шубаев 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 (ВАК, Scopus).

7. *Шубаев 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 (ВАК, Scopus).

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 (ВАК, Scopus).

9. 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 (ВАК).

Объекты интеллектуальной собственности:

10. 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.

11. 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.