

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

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

Иванов Павел Николаевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ГЕНЕРАЦИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ  
ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ СДВИГОВЫХ ВОЛН ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ И УПРУГИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ  
ГОРНЫХ ПОРОД

Специальность 2.8.3

«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 Елена Борисовна

Москва, 2023

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** При современных условиях разработки месторождений инженерно-геологические условия добычи становятся все более сложными. Это обусловлено большими глубинами залегания полезных ископаемых, добыча которых рентабельна для формирования стратегического потенциала минерально-сырьевого комплекса экономики Российской Федерации.

Основными параметрами контроля и мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород являются деформационные характеристики, включающие статические модули упругости и коэффициент Пуассона. Значения данных величин в большинстве случаев получают из результатов лабораторных исследований, и эти же величины используются при проведении численного и компьютерного моделирования поведения массива. Следует отметить, что для корректного описания возможных геодинамических явлений важно знать не только полный набор упругих модулей, но и их изменение при воздействии полями различной природы. Одним из широко применяемых методов определения динамических модулей упругости и исследования структуры образцов является ультразвуковой. Использование нескольких типов акустических волн (например, продольных, сдвиговых, поверхностных), распространяющихся в различных направлениях, позволяет по измеренным скоростям волн восстанавливать полный набор динамических модулей упругости, а также исследовать структурные особенности.

Однако использование ультразвуковых преобразователей сдвиговых волн на пьезоэлементах дает значительную погрешность при определении скоростей распространения волн данного типа. Более того, применение резонансных преобразователей для эффективного возбуждения сдвиговых волн с достаточно узкой полосой частот не позволяет учесть дисперсию фазовой скорости, возникающей за счет дифракции и затухания, и оставляет открытым вопрос, какую скорость определили – фазовую или групповую, и как по данным скоростям рассчитывать динамические модули упругости. В связи со сказанным выше, задача разработки широкополосных ультразвуковых преобразователей для прецизионного измерения скоростей распространения сдвиговых волн является актуальной.

Диссертационное исследование выполнено в рамках 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 метода генерации широкополосных лазерно-ультразвуковых импульсов сдвиговых волн для прецизионного расчета скоростей данного типа волн в образцах горных пород.

**Основная идея работы** заключается в создании широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн, принцип работы которого основан на полной трансформации упругих волн на свободной границе.

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

1. Проведение анализа и систематизации отечественного и зарубежного опыта по методам генерации ультразвуковых волн для определения упругих свойств горных пород;
2. Компьютерное моделирование процесса распространения широкополосных импульсов продольной упругой волны в среде преобразователя и полной ее трансформации в сдвиговую на границе «изотропное твердое тело – воздух» в программном пакете COMSOL Multiphysics;
3. На основе численных расчетов и компьютерного моделирования проектирование лазерно-ультразвукового преобразователя широкополосных импульсов сдвиговых упругих волн, проведение апробации его работы на модельных образцах стекла, нержавеющей стали и алюминия;
4. Построение дисперсионных кривых (зависимостей фазовых скоростей от частоты) в исследованных модельных образцах. Определение частотного диапазона работы преобразователя, при котором значения фазовых и групповых скоростей совпадают;
5. Выявление недостатков и ограничений в работе классического лазерно-ультразвукового преобразователя продольных волн при исследовании образцов горных пород;

6. Выполнение серии измерений скоростей распространения сдвиговых волн в образцах горных пород различного генотипа с помощью разработанного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн;
7. Определение частотных диапазонов работы разработанного преобразователя при исследовании горных пород различной толщины, при которых значения фазовых и групповых скоростей различаются менее чем на 1 %;
8. Определение значений динамических модулей упругости и коэффициента Пуассона для исследованных горных пород;
9. Модернизация разработанного преобразователя и поиск конструктивных решений для повышения его эргономичности.

#### **Основные научные положения и их новизна.**

1. Установлено, что для достижения максимальной трансформации энергии широкополосного импульса продольной волны в сдвиговую необходимо использовать в качестве материала призмы преобразователя сдвиговых волн бесцветное оптическое стекло или тяжелый флинт с геометрическими характеристиками, обеспечивающими углы падения продольной волны  $61,44^\circ$  и  $59,11^\circ$  и отражения сдвиговой волны  $30,35^\circ$  и  $28,82^\circ$  соответственно.

2. Экспериментальные исследования на модельных средах с малым затуханием показали, что характерная длительность возбуждаемых разработанным широкополосным преобразователем импульсов сдвиговых волн лежит в диапазоне от 0,1 до 0,2 мкс, частотный диапазон работы преобразователя составляет от 0,1 до 12 МГц, причем в диапазоне от 1,5 до 9,5 МГц значения фазовых и групповых скоростей совпадают.

3. Установлено, что значения фазовых и групповых скоростей сдвиговых волн различаются менее чем на 1 % при толщинах образцов рассматриваемых горных пород: менее 3,00 мм – в частотном диапазоне 0,5 – 9,0 МГц; от 3,00 до 6,00 мм – в частотном диапазоне 1,3 – 8,0 МГц; от 6,00 до 8,50 мм – в частотном диапазоне 1,6 – 6,5 МГц.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

– использованием при проведении экспериментов апробированных методов лазерно-ультразвуковой диагностики, статистического анализа и сертифицированных программных пакетов;

- сходимостью результатов сопоставления компьютерного моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics с аналитическими расчетами;
- апробацией работы разработанного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых упругих волн на модельных образцах стекла, алюминия и нержавеющей стали;
- удовлетворительной сходимостью результатов измерения сдвиговых упругих волн, полученных с помощью разработанного преобразователя и классической методики в образцах горных пород.

**Методы исследований** включали: анализ и обобщение современного состояния исследований в рассматриваемой области на основе обработки научно-технической информации; компьютерное моделирование распространения упругих волн с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics; лабораторные исследования с использованием установок лазерно-ультразвуковой диагностики, а также иного оборудования, необходимого для решения задач диссертационного исследования; статистические методы обработки и интерпретации полученных результатов с помощью современного программного обеспечения.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке нового широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых упругих волн для прецизионного расчета скоростей распространения данного типа волн и динамических модулей упругости горных пород. Разработанный преобразователь был использован в рамках выполнения договора от 07.12.2022 г., заключенного между НИТУ МИСИС и ООО «Терра Сервис» на оказание научно-технических услуг: «Исследование физико-механических свойств скальных и мерзлых горных пород». Созданная в рамках выполнения договора «Методика определения скоростей распространения ультразвуковых волн и расчета на их основе динамических модулей упругости с помощью широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн» была передана в ООО «Терра Сервис».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях и симпозиумах: XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов (27.03.2019 – 29.03.2019, г. Санкт-Петербург, Россия); XV международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (13.05.2019 – 17.05.2019, г. Санкт-Петербург, Россия); Международная конференция «Innovations in Geology, Mining,

Processing, Economics, Safety and Environmental Management» (05.06.2019 – 07.06.2019, г. Фрайберг, Германия); 14-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (28.10.2019 – 01.11.2019, г. Москва, Россия); Международный научный симпозиум «Неделя Горняка – 2020» (27.01.2020 – 31.01.2020, г. Москва, Россия); 1-я Международная молодежная научная конференция «Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование» (21.04.2020 – 24.04.2020, г. Москва, Россия); XXIX Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2021» (25.01.2021 – 29.01.2021, г. Москва, Россия); XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (12.04.2021 – 16.04.2021, г. Санкт-Петербург, Россия); XVII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (31.05.2021 – 06.06.2021, г. Санкт-Петербург, Россия); XV Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» 25.10.2021–28.10.2021, г. Москва, Россия); XXX Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2022» (01.02.2022 – 04.02.2022, г. Москва, Россия); XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (16.05.2022 – 20.05.2022, г. Санкт-Петербург, Россия); XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2023» (31.01.2023 – 03.02.2023, г. Москва, Россия).

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 6 печатных работ, из них 2 в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 3 – в изданиях, индексируемых наукометрической базой Scopus.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 145 страницах текста, включает 79 иллюстраций, 17 таблиц, библиографический список из 124 наименований.

**Благодарности.** Автор выражает особую благодарность научному руководителю Черепецкой Елене Борисовне за сопровождение работы, ценные советы и обсуждения результатов; к.ф.-м.н. Бычкову Антону Сергеевичу и к.т.н. Шibaеву Ивану Александровичу за помощь и поддержку при решении задач диссертационной работы; коллективу лаборатории ЛУМИИ НИТУ МИСИС за помощь при проведении лабораторных исследований; зав. каф. ФизГео Винникову Владимиру Александровичу за ценные замечания и обсуждения результатов работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** проведен анализ современного состояния исследований по методам генерации ультразвуковых волн и определения на их основе упругих свойств горных пород.

Изучение физико-механических свойств массива горных пород является одним из фундаментальных исследований, определяющих контроль и мониторинг его напряженно-деформированного состояния (НДС), что обеспечивает достижение безопасного ведения горных работ.

Корректная интерпретация сейсмических измерений, каротажных данных, полевых исследований керна требует уточнения полученных результатов в лабораторных условиях. Особое внимание при описании НДС уделяется исследованию упругих свойств горных пород и закономерностей процесса повреждения геоматериала при воздействии физическими полями различной природы.

В ряде работ показано, что лабораторные исследования помогают уменьшить погрешность в значениях упругих параметров, которые используются при численном моделировании. Экспериментально подтверждены теоретические соотношения между плотностью трещин и скоростью сдвиговых волн, найдена зависимость дисперсии скорости продольных волн от толщины слоев в слоистой среде, показана возможность использования отношений продольных волн к сдвиговым для идентификации жидкости, находящейся в порах.

Отмечалось, что в анизотропной трещиноватой среде влияние частоты на скорость распространения упругих волн определяется размерами неоднородностей. При этом затухание, обусловленное как упругим, так и неупругим рассеянием волн, дисперсия скорости сдвиговой волны и размеры трещин связаны между собой. Получено, что увеличение затухания и уменьшение анизотропии скорости сдвиговых волн наблюдается с увеличением частоты. Однако при использовании резонансных пьезоэлектрических преобразователей сдвиговых волн была отмечена сложность определения с необходимой точностью скорости их распространения в горных породах для использования вышеперечисленных результатов. Также они не позволяют учесть дисперсию фазовых скоростей, что приводит к погрешности расчета динамических модулей упругости.

Поэтому исследования направленные на повышение точности определения сдвиговой волны в горных породах являются перспективными, а выбранная тема работы – актуальной. Для достижения поставленной цели в работе предполагается решение сформулированных задач диссертационного исследования.

**Вторая глава** посвящена теоретическому описанию возможности прямой генерации сдвиговой упругой волны в широкополосном ультразвуковом диапазоне с помощью лазерного импульса за счет полной трансформации энергии продольной упругой волны на границе раздела «изотропное твердое тело – воздух».

Для этого была рассмотрена следующая модель. Пусть перпендикулярно к передней грани призмы, выполненной из материала с малым значением коэффициента затухания ультразвука в широком диапазоне частот, падает продольная волна  $L_1^{\Gamma \rightarrow}$  (рис. 1). Поскольку наклонная поверхность призмы граничит с воздухом (является акустически свободной), то вся энергия падающей волны отражается в материал призмы. В отраженном сигнале возникает две волны: продольная и вертикально поляризованная сдвиговая.

Далее по тексту диссертации и в рисунках приняты следующие обозначения: « $L^{\Gamma \rightarrow}$ » – волна, распространяющаяся от генератора; « $L^{\Pi \leftarrow}$ » – волна, распространяющаяся к приемнику;  $1$  – волна, распространяющаяся в среде призмы;  $2$  – волна, распространяющаяся в среде образца.

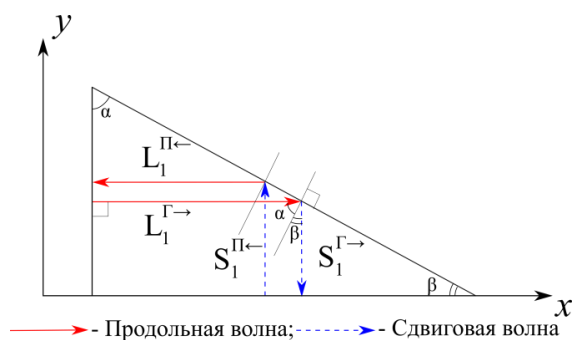


Рисунок 1 – Рассматриваемая модель отражения продольной волны на границе «изотропное твердое тело – воздух»

Пусть угол падения и отражения продольной волны  $\alpha$  (совпадает с углом наклона призмы, рис. 1), угол отражения сдвиговой волны  $\beta$ . Известно, что коэффициенты отражения продольной волны  $R_{LL}$  и коэффициент трансформации продольной в сдвиговую волну  $R_{LS}$  имеют вид:

$$R_{LL} = \frac{ab-p^2}{ab+p^2} \quad (1)$$



$$R_{LS} = \frac{2ap}{ab+p^2} \quad (2)$$

где  $a = \frac{\cos\alpha}{V_L}$ ;  $b = \frac{\cos\beta}{V_S}$ ;  $p^2 = (\sin^2\beta - \frac{1}{2})^2 V_S^{-2} \sin^{-2}\beta$ ;  $V_L$  – скорость продольных волн;  $V_S$  – скорость сдвиговых волн.

Из выражения (1) видно, что если выполняется условие  $ab = p^2$ , в отраженном от свободной границы сигнале исчезает продольная волна  $L_1^{\Gamma \rightarrow}$  ( $R_{LL} = 0$ ). Записав данное выражение через угол падения, получим:

$$\sqrt{\frac{V_L^2}{V_S^2} - \sin^2\alpha} = (\sin^2\alpha - \frac{V_L^2}{2V_S^2})^2 \quad (3)$$

Следует отметить, что в выражении (3) фигурирует отношение скоростей  $\frac{V_L}{V_S}$ , которое определяется коэффициентом Пуассона  $\mu$ :

$$\frac{V_L}{V_S} = \sqrt{2 \frac{1-\mu}{1-2\mu}} \quad (4)$$

Поэтому важным параметром при выборе угла призмы является коэффициент Пуассона материала, из которого она будет выполнена. Коэффициент  $R_{LL}$  можно представить как функцию угла падения продольной волны  $\alpha$  при различных значениях коэффициента Пуассона. Расчет с использованием (3) и (4) показал, что при отражении полная трансформация энергии продольной волны  $L_1^{\Gamma \rightarrow}$  в сдвиговую  $S_1^{\Gamma \rightarrow}$ , происходит, если  $\mu \leq 0,26$ . Таким образом, при проектировании призмы, в которой осуществлялась бы полная трансформация энергии продольной волны в сдвиговую, необходимо решить следующие задачи:

1) Подобрать материал призмы с коэффициентом Пуассона  $\mu \leq 0,26$ , значение которого можно рассчитать по прецизионно измеренным значениям скоростей продольных и сдвиговых волн в соответствии с выражениями (3) и (4);

2) Для выбранного материала с  $\mu \leq 0,26$  выполнить численную оценку угла падения (одного из углов призмы)  $\alpha$  плоской монохроматической продольной волны на свободную границу (рис. 1), при котором в отраженном сигнале наблюдается полная

конверсия ее энергии в сдвиговую. Также нужно оценить угол отражения  $\beta$  сдвиговой волны, что можно сделать на основании формулы:

$$\sqrt{\frac{v_s^2}{v_L^2} - \sin^2 \beta} \times \operatorname{tg}^2(2\beta) = \cos \beta \quad (5)$$

Выражения (3) и (5) получены при условии, что на свободную границу призмы падает плоская монохроматическая продольная волна. Однако в нашем случае на границу раздела падает широкополосный ультразвуковой сигнал с ограниченной апертурой, в котором присутствуют лучи с углом падения, незначительно отличающимися от угла  $\alpha$ . Поэтому при численной оценке необходимо было подобрать значения углов  $\alpha$  и  $\beta$ , при которых наибольшая часть энергии продольной волны преобразуется в сдвиговую для широкополосных пучков продольных волн с ограниченной апертурой.

Для решения этой задачи были измерены скорости упругих ультразвуковых волн, распространяющихся в бесцветном оптическом стекле, кварцевом стекле и в тяжелом флинте, выбранных в ходе проведенного анализа как потенциальные материалы для призмы. Был использован эхо-режим лазерно-ультразвуковой диагностики (ЛУД). Принцип действия эхо-режима ЛУД основан на том, что короткий наносекундный импульс ND:YAG лазера через оптоволокно направляется к генератору преобразователя через призму, выполненную из оргстекла. Вследствие поглощения лазерного излучения и возникновения термоупругого эффекта, возбуждается ультразвуковой импульс продольных волн, с гауссовым распределением давления по поперечному сечению, длительностью порядка 70 нс и амплитудой давления 0,1 МПа, который направляется в исследуемый образец. В результате явлений отражения и преломления на границе раздела «генератор-образец» возникают три волны: первая продольная волна отражается от границы раздела и направляется к приемнику, сигнал от которой является опорным  $L_{02}^{\text{П}\leftarrow}$ ; вторая продольная волна и образовавшиеся сдвиговая волны направляются в исследуемый образец, частично рассеиваются на неоднородностях, отражаются от тыльной стороны образца и регистрируются приемником. Полученные сигналы после усиления обрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения на основе измерения времен распространения каждого из типов волн.

Уравнения (3) и (5) должны иметь два решения для угла призмы  $\alpha$  и угла отражения  $\beta$  сдвиговой волны. Исходя из полученных результатов и обработки каждого решения, были определены следующие углы при использовании того, или иного материала:

1) Кварцевое стекло:  $\alpha_1 = 86,39^\circ, \beta_1 = 38,75^\circ; \alpha_2 = 47,85^\circ, \beta_2 = 27,71^\circ;$

2) Бесцветное оптическое стекло:  $\alpha_1 = 61,74^\circ, \beta_1 = 30,33^\circ; \alpha_2 = 75,65^\circ, \beta_2 = 33,90^\circ;$

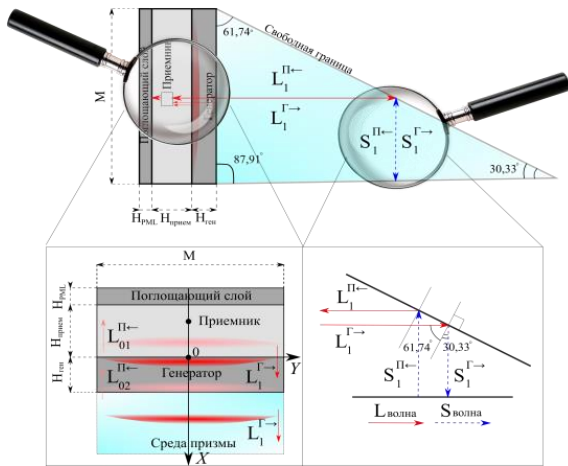
3) Тяжелый флинт:  $\alpha_1 = 59,11^\circ, \beta_1 = 28,82^\circ; \alpha_2 = 77,99^\circ, \beta_2 = 34,53^\circ.$

Для определения комбинации углов падения и отражения, при которых наибольшая часть энергии продольной волны с ограниченной апертурой преобразуется в сдвиговую, было проведено компьютерное моделирование с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics в модуле Acoustic Solid Interaction Transient.

Общий вид расчетной модели для призмы, выполненной из бесцветного оптического стекла с углами  $\alpha_1 = 61,74^\circ, \beta_1 = 30,33^\circ$  приведен на рисунке 2, а. В модели задан генератор толщиной  $H_{ген}$  и шириной  $M$ . В нем происходит возбуждение ультразвукового импульса продольной волны  $L_1^{\Gamma \rightarrow}$ , который направляется в среду призмы, где импульсы продольной волны конвертируются в сдвиговую. При этом на границе раздела «генератор-призма» происходит частичное отражение этого импульса в направлении к приемнику. При моделировании предполагалось, что сигналы, отраженные от всех границ, регистрируются точечным приемником, расположенном в точке  $X_{прием}$  слоя  $H_{прием}$ . Для исключения переотражения на верхней границе слоя  $H_{прием}$  задавалась среда  $H_{PML}$ , идеально согласованная по акустическим импедансам (Perfectly Matched Layers). Данная среда обладает сильным поглощением волн, при этом от ее границы не происходит отражений. Материал призмы был задан как изотропный, идеально упругий. Наклонная поверхность призмы считалась свободной. Начальные условия по смещениям и скоростям – нулевые.

На рисунке 2, б представлен временной профиль модельного сигнала для угла призмы  $\alpha_1 = 61,74^\circ$  и угла отражения сдвиговой волны  $\beta_1 = 30,35^\circ$ . Видно, что амплитуда сдвиговой волны достигает 0,102 Па, при амплитуде падающей продольной волны 1 Па.

а)



б)

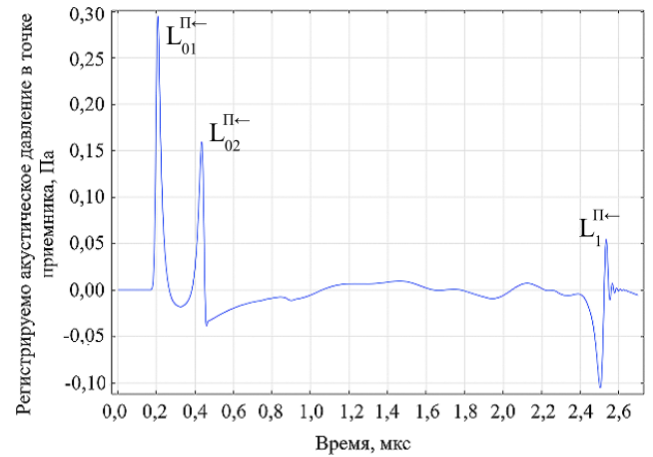


Рисунок 2– а) Общий вид расчетной модели; б) Полученный при моделировании временной профиль сигнала призмы из бесцветного оптического стекла с углами  $\alpha_1 = 61,74^\circ, \beta_1 = 30,35^\circ$

Далее по аналогичной схеме было выполнено компьютерное моделирование для всех комбинаций материалов и углов призмы. В табл. 1 приведены значения полученных амплитуд импульсов сдвиговых волн  $L_1^{П<math>\leftarrow</math>}$ .

Таблица 1 – Амплитуды импульсов сдвиговых волн  $L_1^{П<math>\leftarrow</math>}$ , зарегистрированные приемником для каждой рассматриваемой комбинации углов призмы и ее материала

Материал	Кварцевое стекло		Бесцветное оптическое стекло		Тяжелый флинт	
	Комбинация углов	Амплитуда $L_1^{П<math>\leftarrow</math>}$ , Па	Комбинация углов	Амплитуда $L_1^{П<math>\leftarrow</math>}$ , Па	Комбинация углов	Амплитуда $L_1^{П<math>\leftarrow</math>}$ , Па
Комбинация углов	$\alpha_1 = 86,39^\circ, \beta_1 = 38,75^\circ$	0,02	$\alpha_1 = 61,74^\circ, \beta_1 = 30,33^\circ$	0,102	$\alpha_1 = 59,11^\circ, \beta_1 = 28,82^\circ$	0,107
Амплитуда $L_1^{П<math>\leftarrow</math>}$ , Па	0,092	0,075	0,09	0,075	0,107	0,075

В результате компьютерного моделирования установлено, что наиболее «чистые» по количеству паразитных сигналов, а также наибольшие амплитуды импульсов сдвиговых волн  $L_1^{П<math>\leftarrow</math>}$  достигаются при использовании в качестве материала бесцветного оптического стекла и тяжелого флинта с углами призм  $\alpha_1 = 61,74^\circ, \beta_1 = 30,33^\circ$  и  $\alpha_1 = 59,11^\circ, \beta_1 = 28,82^\circ$  соответственно. Иные комбинации в дальнейшем не рассматривались. Поэтому, исходя из технических решений, численных оценок и компьютерного моделирования, преобразователь сдвиговых волн будет состоять из существующего оптико-акустического преобразователя продольных волн ПЛУ-6П-02, к генератору которого будет примыкать призма из бесцветного оптического стекла с углами призмы  $\alpha_1 = 61,74^\circ, \beta_1 = 30,33^\circ$  или из тяжелого флинта с углами сторон  $\alpha_1 = 59,11^\circ, \beta_1 = 28,82^\circ$ .

В третьей главе представлены результаты по проектированию и разработке лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн, измерению параметров данных волн, возбуждаемых в модельных образцах с малым затуханием ультразвука с помощью разработанного преобразователя; дано сравнение значений полученных скоростей сдвиговых волн и их амплитуд со значениями, определенными с использованием стандартного оптико-акустического преобразователя продольных волн (ПЛУ-6П-02); определен частотный диапазон работы разработанного преобразователя, при котором значения фазовых и групповых скоростей совпадают.

На этапе проектирования преобразователя сдвиговых волн были учтены паразитные сигналы, которые возникают в преобразователе ПЛУ-6П-02. Для исключения вариантов их наложения на полезные сигналы от рабочей стороны призмы, были определены «безопасные рабочие зоны», с учетом которых были выбраны оптимальные по геометрическим размерам призмы из выбранных материалов (рис. 3).

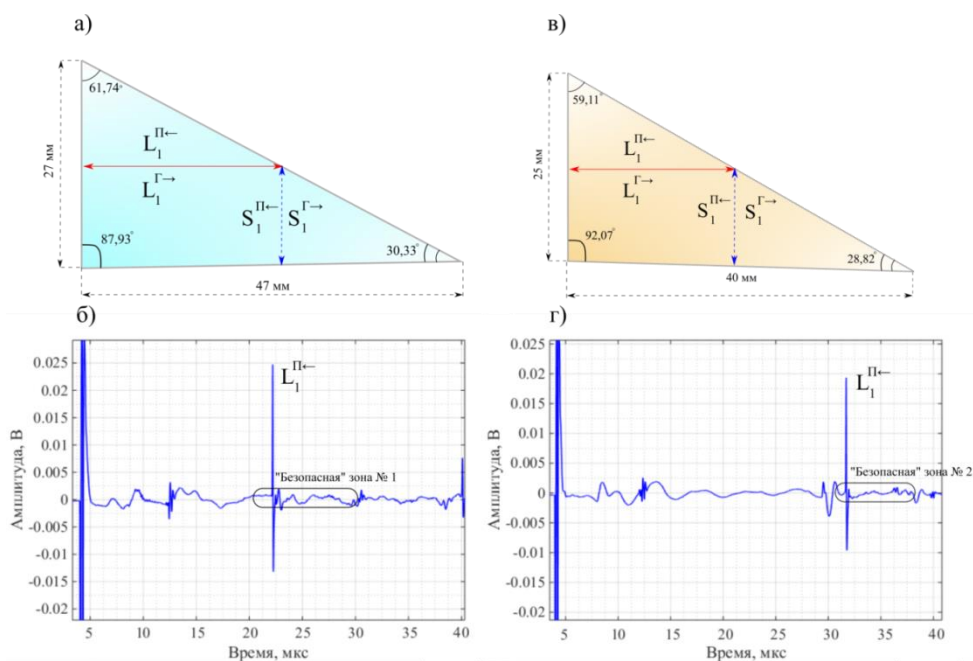


Рисунок 3 – Схематическое изображение призм и соответствующие им временные формы сигналов а, б – выполненной из бесцветного оптического стекла, в, г – из тяжелого флинта

Исходя из вышеперечисленных условий, был разработан проект преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01 («Преобразователь Лазерно-Ультразвуковой – Сдвиговые Волны – Версия №1»), сечения и 3D модель которого приведен на рис. 4 для случая применения призмы из бесцветного оптического стекла.

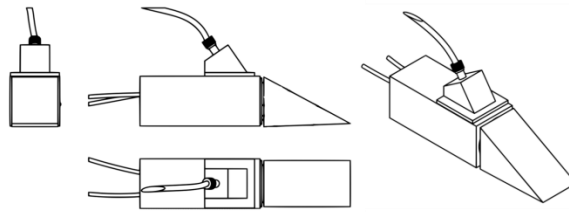


Рисунок 4 – 3 сечения и 3D модель преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01

Согласно разработанной схеме, изготовленная из бесцветного оптического стекла или тяжелого флинта призма (в соответствии с рис. 3) одной из сторон примыкает к генератору преобразователя ПЛУ-6П-02, а на другую сторону устанавливается исследуемый образец, как показано на рис. 5. Важной задачей на данном этапе работы являлось обеспечение прохождения сдвиговой волны  $S_1^{\Gamma \rightarrow}$  в исследуемый образец. На рис. 5 приведено поэтапное распространение ультразвуковых волн в среде призмы при наличии образца. В начале приемником будут зарегистрированы зондирующий  $L_{01}^{\Pi \leftarrow}$  и опорный  $L_{02}^{\Pi \leftarrow}$  импульсы, возникшие в результате переотражений в преобразователе ПЛУ-6П-02. Затем будет зарегистрирован импульс продольной волны  $L_1^{\Pi \leftarrow}$ , возникший в результате отражения сдвиговой волны  $S_1^{\Gamma \rightarrow}$  от границы раздела «призма-образец» (рис. 3.6, а). В соответствии с рис. 5, б, большая часть энергии сдвиговой волны  $S_1^{\Gamma \rightarrow}$  также будет направлена в исследуемую среду, отразится от тыльной стороны образца в волну  $S_2^{\Pi \leftarrow}$ , пройдет в среду призмы как волна  $S_{2 \rightarrow 1}^{\Pi \leftarrow}$  и в результате трансформации на свободной границе будет зарегистрирована приемником как продольная волна  $L_{2 \rightarrow 1}^{\Pi \leftarrow}$ . Таким образом, при наличии исследуемого образца условием корректной работы преобразователя ПЛУ-СВ-01 является наличие на временной форме сигнала импульса  $L_{2 \rightarrow 1}^{\Pi \leftarrow}$ .

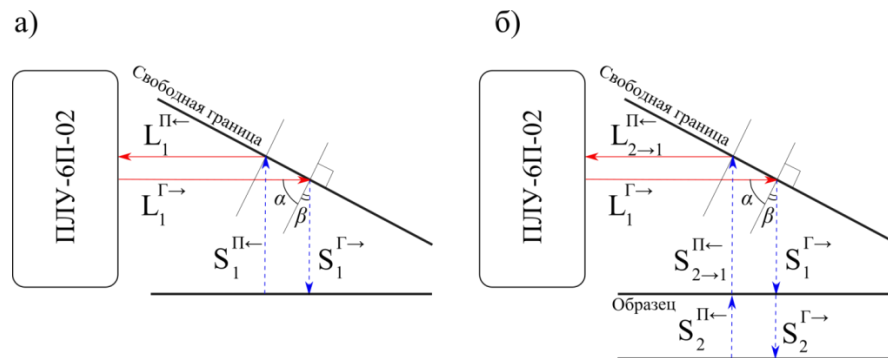


Рисунок 5 – Схематическое изображение распространения импульса продольной волны в среде призмы при отсутствии (а) и наличии (б) образца

Для верификации результатов измерений, выполненных с помощью разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01, были определены скорости распространения сдвиговых волн в образцах стекла различных марок, стали и алюминия, которые сравнивались с результатами, полученными при использовании стандартного оптико-акустического преобразователя ПЛУ-6П-02. Выбор материалов был обусловлен необходимостью соблюдения однородности структур образцов.

На рис. 6 приведена характерная усредненная по 5 точкам временная форма сигнала, полученная при сканировании образца из бесцветного оптического стекла с помощью преобразователя ПЛУ-6П-02. На сигнале обозначены зондирующий  $L_{01}^{\Pi\leftarrow}$  и опорный  $L_{02}^{\Pi\leftarrow}$  импульсы. Также отчетливо идентифицируются сигналы, зарегистрированные при первом  $L_{\text{ЭХО}}^1$  и втором  $L_{\text{ЭХО}}^2$  отражении от тыльной стороны образцов. Между данными импульсами расположен импульс сдвиговой волны  $S_{\text{ЭХО}}$ , положение которого определялась после дифференцирования полученного сигнала.

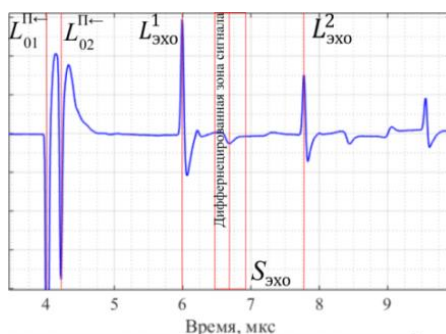


Рисунок 6 – Усредненная временная форма сигнала, регистрируемая при исследовании образцов из бесцветного оптического стекла

Следует отметить, что одним из недостатков методики работы с классическим преобразователем ПЛУ-6П-02 является сложность регистрации времени прихода импульса сдвиговой волны  $T_{S_{\text{ЭХО}}}^{\text{min}}$ . Так, на рис. 7 представлена форма сигнала сдвиговой волны для одного из образцов нержавеющей стали, из которой видна неочевидность идентификации времени регистрации. Это связано с поликристаллической структурой образцов нержавеющей стали, что приводит к рассеянию сдвиговой волны. Для решения этой проблемы довольно часто приходится использовать справочные значения скоростей распространения в исследуемом материале для определения положения импульса сдвиговой волны на временной форме, что искажает объективность исследования.

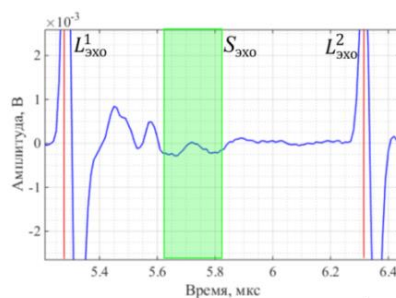


Рисунок 7 – Временная форма сигнала, полученная при исследовании одного из образцов нержавеющей стали (фронт сдвиговой волны выделен в зеленый прямоугольник)

На рис. 8 приведена усредненная по 5 точкам временная форма сигнала, полученная при сканировании разработанным преобразователем ПЛУ-СВ-01 образца из нержавеющей стали. На сигнале обозначены зондирующий  $L_{01}^{\Pi\leftarrow}$  и опорный  $L_{02}^{\Pi\leftarrow}$  импульсы. Отчетливо наблюдается импульс сдвиговой волны  $L_1^{\Pi\leftarrow}$ , зарегистрированный в результате отражения продольной волны от грани призмы, примыкающей к исследуемому образцу в соответствии с рис. 5, б. В правой части рисунка в увеличенном масштабе приведена временная форма зарегистрированного искомого импульса сдвиговой волны  $L_{2\rightarrow 1}^{\Pi\leftarrow}$ . Также отчетливо регистрируется второе отражение сдвиговой волны от тыльной стороны исследуемого образца.

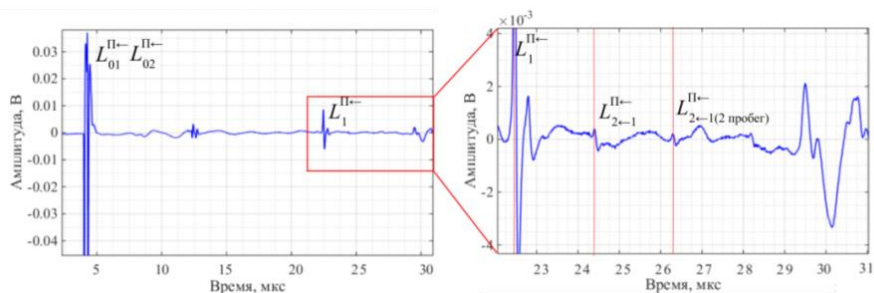


Рисунок 8 – Временная форма сигнала, полученная при исследовании одного из образцов нержавеющей стали с расставленными строгами регистрации времен прихода полезных импульсов

На втором этапе были рассчитаны скорости распространения сдвиговых волн по формулам (6) (ПЛУ-6П-02) и (7) (ПЛУ-СВ-01).

$$V_{S1} = \frac{h_{обр}}{(T_{S_{\text{эхо}}}^{\min} - T_{L_{\text{эхо}}^1}^{\max}) + \frac{h_{обр}}{V_L}} \quad (6)$$

$$V_{S2} = \frac{2h_{обр}}{(T_{L_{2\rightarrow 1}^{\Pi\leftarrow}}^{\max} - T_{L_1^{\Pi\leftarrow}}^{\max})} \quad (7)$$



где  $h_{обр}$  – толщина образца;  $T_{S_{\text{эхо}}}^{min}$  – зарегистрированное по минимуму время прихода импульса сдвиговой волны с помощью ПЛУ-6П-02;  $T_{L_{\text{эхо}}^1}^{max}$  – зарегистрированное по максимуму время прихода импульса первого отражения продольной волны от тыльной поверхности образца с помощью ПЛУ-6П-02;  $V_L$  – скорость продольной волны;  $T_{L_1}^{max}$  – зарегистрированное по максимуму время прихода импульса первого отражения сдвиговой волны от поверхности образца, примыкающей к призме с помощью ПЛУ-СВ-01;  $T_{L_{2 \rightarrow 1}}^{max}$  – зарегистрированное по максимуму время прихода импульса второго отражения сдвиговой волны от тыльной поверхности образца.

Исходя из проведенных измерений, выполненных с помощью классического преобразователя ПЛУ-6П-02 и преобразователя ПЛУ-СВ-01, в табл. 2 приведены сводные результаты расчётов скоростей распространения сдвиговых волн. Цветом выделены образцы, при исследовании которых возникли сомнения в точности определения скоростей с помощью преобразователя ПЛУ-6П-02.

Таблица 2 – Результаты измерения скоростей распространения сдвиговых упругих волн с помощью классической методики (преобразователь ПЛУ-6П-02) и с помощью разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01

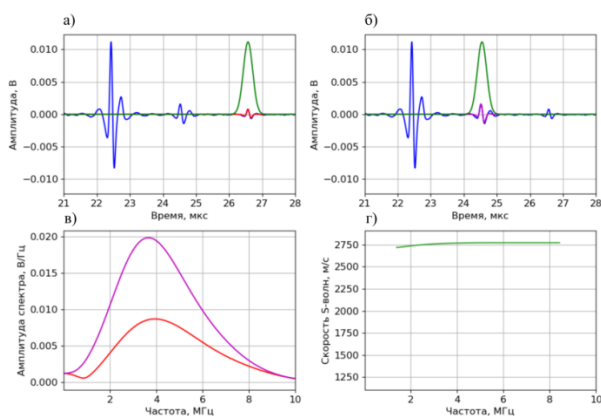
	$V_{S1}$ , м/с ПЛУ-6П-02	$V_{S2}$ , м/с ПЛУ-СВ-01	$V_{S2} - V_{S1}$ , м/с	$\frac{V_{S2} - V_{S1}}{V_{S2}}$ , %
<b>Оптическое стекло</b>				
1	3365	3364	-1	-0,03
2	3351	3384	33	0,98
3	3375	3393	18	0,53
4	3350	3372	22	0,66
5	3350	3381	31	0,93
6	3360	3391	31	0,92
7	3373	3384	11	0,33
<b>Нержавеющая сталь</b>				
1	3042	2994	-48	-1,58
2	3033	3071	38	1,25
3	3055	3057	2	0,07
4	3023	3070	47	1,55
<b>Алюминий</b>				
1	3080	3063	-17	-0,55
<b>Сине-зеленое стекло СЗС-20</b>				
1	2655	2705	50	1,88
<b>Пурпурное стекло ПС-14</b>				
1	2712	2737	25	0,92
<b>Пурпурное стекло ПС-13</b>				
1	2546	2576	30	1,18
<b>Оранжевое стекло ОС-11</b>				
1	3211	<b>3208</b>	-3	-0,09

Продолжение таблицы 2.

	$V_{S1}$ , м/с ПЛУ-6П-02	$V_{S2}$ , м/с ПЛУ-СВ-01	$V_{S2} - V_{S1}$ , м/с	$\frac{V_{S2}-V_{S1}}{V_{S2}}$ , %
<b>Желтое стекло ЖС-19</b>				
1	3435	<b>3433</b>	-2	-0,06
<b>Синее стекло СС-4</b>				
1	3359	3399	40	1,19

Из приведенных результатов видно, что значения скоростей сдвиговых волн, измеренных с помощью преобразователя ПЛУ-СВ-01, близки к скоростям, измеренным в эхо-режиме ЛУД с помощью преобразователя ПЛУ-6П-02. Разница скоростей составила от 0,03 % до 1,58 %. При этом, наиболее высокий процент разницы в результатах измерений составил для нержавеющей стали, стекол марки СЗС-20, ПС-13, СС-4, при исследовании которых с помощью ПЛУ-6П-02 были выявлены сложности определения времени регистрации сдвиговой волны ввиду «расплывания» фронта ее импульса. Поскольку при использовании преобразователя ПЛУ-СВ-01 в исследуемый образец направляется прямая сдвиговая волна, данная проблема решается.

Далее необходимо было определить рабочий частотный диапазон преобразователя на основе анализа дисперсионных кривых. На рис. 9 приведен пример типовой обработки сигнала, полученного для образца сине-зеленого стекла СЗС-20. Анализ построенной дисперсионной кривой позволил установить стабилизацию значений скоростей сдвиговых волн в диапазоне частот 1,6-8 МГц. Разброс значений скоростей в данном частотном диапазоне составляет менее 1 %.



а) Выделение с помощью оконной функции импульса  $L_{2 \rightarrow 1}^{П \leftarrow}$ ; б) Выделение с помощью оконной функции импульса  $L_{2 \rightarrow 1}^{П \leftarrow}$ ; в) построенные спектры сигналов первого и второго донных отражений; Зависимость скоростей сдвиговых волн от частоты

Рисунок 9 – Пример типовой обработки сигнала, полученного при исследовании образца СЗС-20 с помощью преобразователя ПЛУ-СВ-01.

В табл. 3 приведены результаты анализа дисперсионных кривых для исследуемых модельных образцов.

Таблица 3 – Значения фазовых скоростей сдвиговых волн в зависимости от частотного диапазона

№	Образец	Частотный диапазон, МГц	Интервал фазовых скоростей, м/с	Средняя скорость, м/с	Разброс значений скоростей, м/с	Групповая скорость, полученная с помощью ПЛУ-СВ-01 м/с
1	ОСБ	1,0-9,0	3350-3385	3370	35	3364
2		1,1-9,0	3360-3390	3375	30	3384
3		0,9-9,7	3365-3400	3385	35	3393
4		1,1-9,5	3365-3395	3375	30	3372
5		1,5-8,9	3360-3380	3370	20	3381
6		1,3-9,0	3370-3400	3385	30	3391
7		1,0-10,0	3370-3390	3380	20	3384
1	Нержавеющая сталь	1,5-10,0	3010-3020	3000	10	2994
2		4,0-10,0	3060-3090	3370	30	3071
3		1,5-10,0	3030-3060	3045	30	3057
4		1,5-10,0	3050-3080	3065	30	3070
1	Алюминий	2,0-9,8	3055-3080	3070	25	3063
1	СЗС-20	2,0-8,0	2690-2720	2700	30	2705
1	ПС-14	1,5-8,0	2710-2745	2730	35	2737
1	ПС-13	2,0-8,5	2575-2595	2580	20	2576
1	ОС-11	1,6-8,2	3200-3220	3210	20	3208
1	ЖС-19	3,0-10,0	3420-3440	3430	30	3433
1	СС-4	0,6-9,6	3380-3405	3390	26	3399

Характерная длительность возбуждаемых разработанным широкополосным преобразователем импульсов сдвиговых волн лежит в диапазоне от 0,1 до 0,2 мкс. Частотный диапазон работы преобразователя составляет от 0,1 до 12 МГц, причем в диапазоне от 1,5 до 9,5 МГц значения фазовых и групповых скоростей совпадают.

**В четвертой главе** выполнена серия измерений скоростей распространения сдвиговых волн в образцах горных пород различного генотипа с помощью разработанного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн; определены частотные диапазоны работы разработанного преобразователя при исследовании горных пород различной толщины, при которых значения фазовых и групповых скоростей различаются менее чем на 1 %.

Были определены скорости распространения сдвиговых волн в образцах базальта, долерита, шунгита, аргиллита и известняка. Исследования с помощью классической методики (преобразователь ПЛУ-6П-02) показали фактическую невозможность определения скоростей распространения сдвиговых волн в тонких (менее 3,00 мм)

образцах в результате наложения импульса сдвиговой волны на импульсы первого и второго отражений продольной волны от тыльной поверхности образцов. Установлено, что паразитные сигналы, возникающие вследствие конструкционных особенностей классического преобразователя ПЛУ-6П-02, расположены вблизи полезных импульсов продольных и сдвиговых волн при толщинах образцов горных пород более 6,00 мм.

При исследовании образцов шунгитов было отмечено, что сложности в интерпретировании сигналов присутствовали при исследовании некоторых образцов вне зависимости от их толщины ввиду высокой степени неоднородности структуры.

Описанные проблемы были решены с помощью разработанного преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01. На рис. 10, 11 приведены примеры временных форм сигналов для образцов базальта толщиной 2,20 мм (рис. 10) и 6,15 мм (рис. 11).

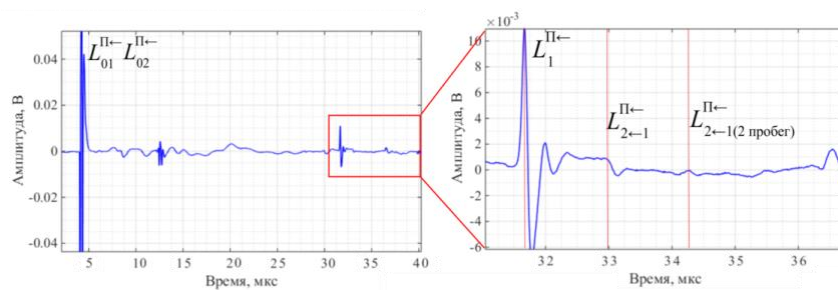


Рисунок 10 – Временная форма сигнала для образца базальта 1\_Vaz\_4

Из временной формы (рис. 10) видно, что достаточно отчетливо регистрируется первое  $L_{2 \rightarrow 1}^{П \leftarrow}$  и второе отражение сдвиговой волны от тыльной поверхности образца, что позволяет измерять скорость ее распространения. При исследовании данного образца с помощью классической методики (ПЛУ-6П-02) на временной форме сигнала не удалось идентифицировать импульс сдвиговой волны, и, соответственно, рассчитать ее скорость. Качественные результаты были получены и для образцов базальта больших по толщине (рис. 11).

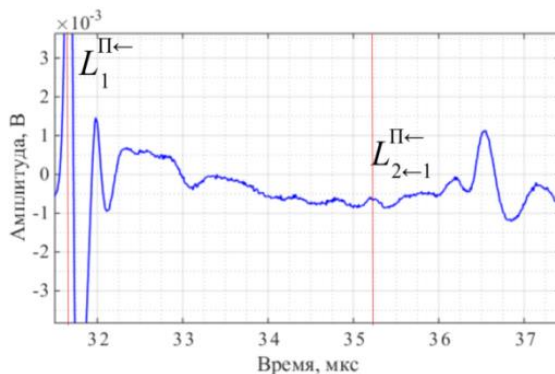


Рисунок 11 – Временная форма сигнала образца базальта 1\_Vaz\_7

Однако при исследовании образцов шунгита была обнаружена следующая проблема. Как было описано ранее, у классического преобразователя ПЛУ-6П-02 присутствуют паразитные сигналы, которые возникают вследствие его конструкционных особенностей, что ограничивают «безопасную рабочую зону» изготовленного преобразователя ПЛУ-СВ-01. Это привело к наложению полезных импульсов сдвиговых волн на паразитные сигналы при исследовании образцов шунгита от 6,00 мм до 8,00 мм. Пример данной ситуации приведен на рис. 12, а, (образец 4\_Shun\_7, толщиной 6,65 мм). Данная проблема устранялась двумя методами.

Первое решение заключалось в замене призмы из тяжелого флинта на бесцветное оптическое стекло. Поскольку «безопасная зона» в случае использования данной призмы больше (рис. 3,б, от 20 мкс до 30 мкс), чем в призме из тяжелого флинта (рис. 3, г, от 31 мкс до 37 мкс), ее хватало для исследования образцов больших по толщине (до 8,00 мм). При ее использовании, импульс  $L_1^{П←}$  не накладывался на паразитные сигналы (рисунок 12, б).

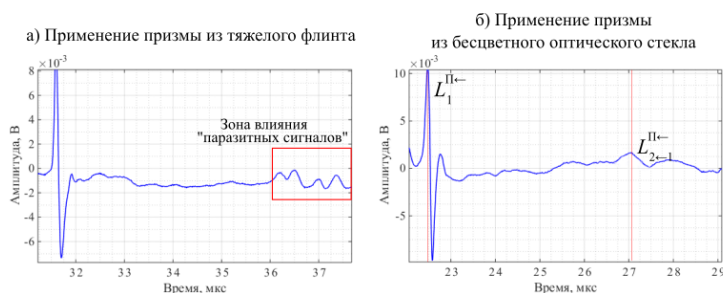
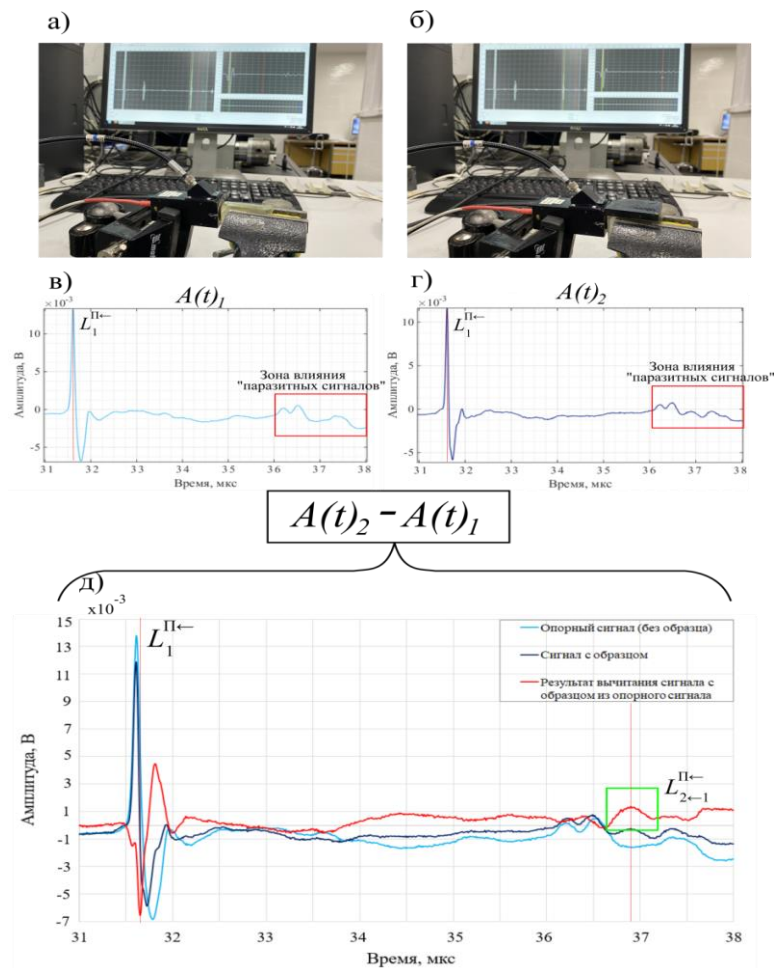


Рисунок 12 – Временные формы сигналов, полученные при использовании в качестве материала призмы тяжелого флинта (а) и бесцветного оптического стекла (б) для исследования образца 4\_Shun\_7, толщиной 6,65 мм

Второе решение описанной проблемы заключалось в следующем. Поскольку для выделения полезного импульса сдвиговых волн необходимо обеспечить отсутствие влияния паразитного сигнала для исключения ошибки определения максимума импульса  $L_{2→1}^{П←}$ , была произведена дополнительная обработка полученных сигналов. Для этого вначале был зафиксирован опорный сигнал  $A(t)_1$ , при случае отсутствия на рабочей грани призмы образца (рис. 13, а, в). На рис. 13, в, г, красным прямоугольником выделены зоны влияния паразитных сигналов. Затем при непосредственном контакте рабочей грани призмы с образцом (рис. 13, б, г) была получена временная форма  $A(t)_2$ . Для того, чтобы отсеять паразитные сигналы, было произведено вычитание  $A(t)_2 - A(t)_1$ , результат которого приведен на рис. 13, д. На данном сигнале уже достаточно отчетливо

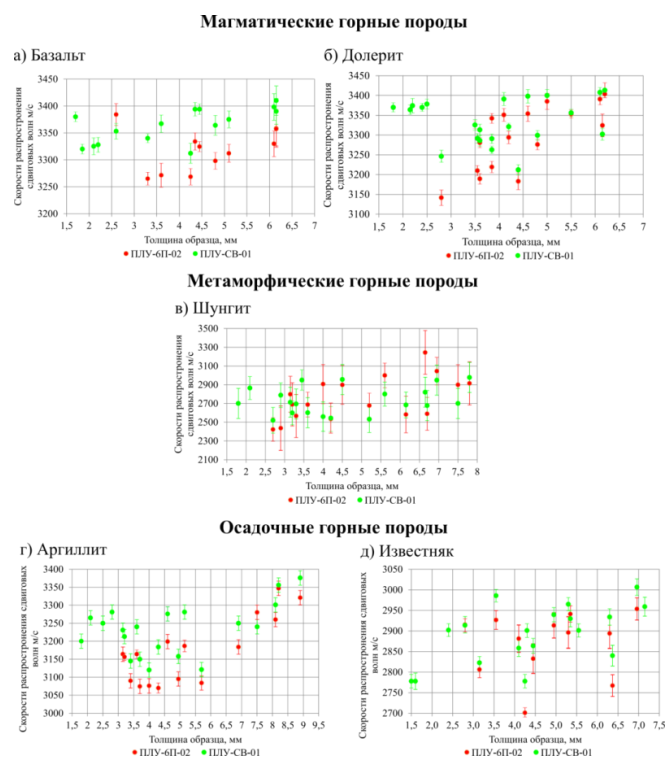
регистрируется искомый импульс  $L_{2 \rightarrow 1}^{\leftarrow}$ , который впоследствии использовался для расчета скорости распространения сдвиговой волны.



- а) Получение опорного сигнала; б) Получение сигнала с образцом;  
 в) Опорный сигнал; г) Сигнал с образцом; д) Результат вычитания сигнала с образцом из опорного сигнала

Рисунок 13 – Процесс дополнительной обработки временных форм сигналов для улучшения качества регистрации импульса сдвиговой волны

На рис. 14 приведены значения скоростей распространения сдвиговых волн в вышеописанных образцах горных пород, измеренные с помощью классической методики и разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01. При измерении скоростей сдвиговых волн с использованием разработанного преобразователя разброс в значениях последних уменьшился, а также уменьшились стандартное отклонение, коэффициенты вариации и осцилляции. Кроме этого, для всех образцов горных пород различных генотипов толщиной менее 3,00 мм удалось рассчитать скорости распространения сдвиговых волн благодаря получению с помощью разработанного преобразователя качественных временных форм сигналов.



**Рисунок 14 – Результаты расчёта скоростей распространения сдвиговых волн, измеренных с помощью классической методики (ПЛУ-6П-02) и разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01**

Значения скоростей сдвиговых волн, полученных при использовании разработанного преобразователя, больше в среднем на 50 – 70 м/с, чем при использовании классической методики. Это можно объяснить тем, что при применении классического лазерно-ультразвукового преобразователя продольных волн ПЛУ-6П-02 максимум диаграммы направленности возникающих на границе раздела «генератор - образец» сдвиговых волн не строго перпендикулярен к границе, а составляет некоторый достаточно малый угол (порядка  $0,2^\circ$ ) с нормалью к поверхности образца. Это означает, что при условной толщине образцов 5,00 мм наблюдается увеличение акустического пути примерно на 60-80 мкм и, соответственно, времени распространения акустического импульса на несколько десятков наносекунд, что и приводит при расчете к уменьшению скорости сдвиговой волны на 50-70 м/с. Также были уточнены те значения скоростей, которые вызывали сомнение при применении классической методики, благодаря замене призмы из тяжелого флинта на бесцветное оптическое стекло или проведению дополнительной математической обработки сигналов.

Далее были установлены границы частотных диапазонов и размеров образцов, при которых значения фазовых и групповых скоростей, измеряемых разработанным широкополосным преобразователем ультразвуковых импульсов сдвиговых волн, будут

отличаться менее чем на 1 %. Определение фазовых скоростей сдвиговых волн проводилось в соответствии с алгоритмом, приведенным в разделе 3.4 диссертационной работы. Образцы каждого типа горных пород были разделены на три группы в зависимости от их толщины: 1) до 3,00 мм; 2) от 3,00 до 6,00 мм; 3) более 6,00 мм.

В табл. 4 представлены полученные для каждой группы горных пород усредненные частотные диапазоны в зависимости от толщины образцов.

Таблица 4 – Частотные диапазоны в зависимости от типа горной породы и толщины исследуемых образцов, при которых значения фазовых и групповых скоростей отличаются менее чем на 1 %

	До 3,00 мм	От 3,00 до 6,00 мм	От 6,00 до 8,50 мм
Базальт	0,6 – 8,15 МГц	1,15 – 6,5 МГц	1,5 – 4,7 МГц
Долерит	0,9 – 8,2 МГц	1,1 – 6,7 МГц	1,15 – 6,95 МГц
Шунгит	1,5 – 8,85 МГц	2,0 – 8,5 МГц	2,1 – 6,15 МГц
Антрацит	0,1 – 10,0 МГц	1,15 – 8,3 МГц	1,35 – 8,1 МГц
Известняк	0,9 – 9,1 МГц	1,0 – 8,5 МГц	1,52 – 6,4 МГц

Резюмируя полученные результаты и усредняя частотные диапазоны по толщинам, можно сделать вывод о том, что для рассматриваемых в настоящей диссертации образцов горных пород значения фазовых и групповых скоростей отличаются менее чем на 1 % при толщинах образцов рассматриваемых горных пород: менее 3,00 мм - в частотном диапазоне 0,8 – 8,85 МГц; от 3,00 до 6,00 мм - в частотном диапазоне 1,3 – 7,7 МГц; от 6,00 до 8,50 мм - в частотном диапазоне 1,6 – 6,5 МГц.

По скоростям распространения продольных волн, и сдвиговых волн, измеренных с помощью классической методики и разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01, были рассчитаны динамические модули упругости и коэффициенты Пуассона. Математическая обработка полученных результатов для каждой горной породы приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты математической обработки рассчитанных динамических модулей упругости и коэффициента Пуассона

	Базальт					
	ПЛУ-6П-02			ПЛУ-СВ-01		
	$E_1$ , ГПа	$G_1$ , ГПа	$\mu_1$	$E_2$ , ГПа	$G_2$ , ГПа	$\mu_2$
Среднее значение, ГПа	81,08	31,44	0,29	83,48	32,63	0,28
Медиана, ГПа	81,09	31,49	0,29	84,04	32,76	0,28
Размах, ГПа	7,34	3,14	0,04	5,07	2,19	0,03
Стандартное отклонение, ГПа	2,23	0,98	0,01	1,71	0,72	0,01
Коэффициент вариации, %	2,75	3,10	3,95	2,05	2,20	3,77
Коэффициент осцилляции, %	9,05	9,98	13,24	6,07	6,72	11,64



Продолжение таблицы 5.

<b>Долерит</b>						
	ПЛУ-6П-02			ПЛУ-СВ-01		
	$E_1$ , ГПа	$G_1$ , ГПа	$\mu_1$	$E_2$ , ГПа	$G_2$ , ГПа	$\mu_2$
Среднее значение, ГПа	81,92	32,26	0,27	83,57	33,06	0,26
Медиана, ГПа	81,96	32,74	0,27	84,18	33,10	0,26
Размах, ГПа	13,50	6,51	0,04	10,22	4,28	0,04
Стандартное отклонение, ГПа	4,88	2,68	0,01	2,97	1,22	0,01
Коэффициент вариации, %	5,74	6,19	4,10	3,56	3,70	3,46
Коэффициент осцилляции, %	16,27	18,09	16,40	12,23	12,96	15,29
<b>Шунгит</b>						
	ПЛУ-6П-02			ПЛУ-СВ-01		
	$E_1$ , ГПа	$G_1$ , ГПа	$\mu_1$	$E_2$ , ГПа	$G_2$ , ГПа	$\mu_2$
Среднее значение, ГПа	41,86	17,00	0,23	40,80	16,47	0,24
Медиана, ГПа	39,30	16,21	0,23	40,29	16,51	0,25
Размах, ГПа	22,58	11,10	0,15	16,31	6,27	0,12
Стандартное отклонение, ГПа	6,85	3,02	0,04	4,73	1,92	0,03
Коэффициент вариации, %	16,35	17,74	16,65	11,60	11,64	14,15
Коэффициент осцилляции, %	53,95	65,29	64,25	35,97	35,07	49,72
<b>Аргиллит</b>						
	ПЛУ-6П-02			ПЛУ-СВ-01		
	$E_1$ , ГПа	$G_1$ , ГПа	$\mu_1$	$E_2$ , ГПа	$G_2$ , ГПа	$\mu_2$
Среднее значение, ГПа	60,90	25,94	0,17	60,50	25,92	0,17
Медиана, ГПа	61,34	25,82	0,18	60,11	25,87	0,17
Размах, ГПа	10,16	4,64	0,05	9,04	4,16	0,04
Стандартное отклонение, ГПа	3,16	1,53	0,02	2,92	1,28	0,01
Коэффициент вариации, %	5,18	5,90	8,62	4,82	4,92	3,93
Коэффициент осцилляции, %	18,68	18,90	30,16	17,91	17,11	20,96
<b>Известняк</b>						
	ПЛУ-6П-02			ПЛУ-СВ-01		
	$E_1$ , ГПа	$G_1$ , ГПа	$\mu_1$	$E_2$ , ГПа	$G_2$ , ГПа	$\mu_2$
Среднее значение, ГПа	49,27	19,34	0,27	49,48	19,50	0,27
Медиана, ГПа	49,87	19,72	0,28	48,76	19,22	0,27
Размах, ГПа	9,15	3,82	0,03	8,71	3,49	0,03
Стандартное отклонение, ГПа	2,85	1,20	0,01	2,70	1,13	0,01
Коэффициент вариации, %	5,79	6,21	3,34	5,46	5,82	3,66
Коэффициент осцилляции, %	18,57	19,77	10,78	17,61	17,90	9,08

Как видно из результатов, разброс значений динамических упругих модулей и коэффициента Пуассона уменьшились, а также уменьшились стандартное отклонение, коэффициенты вариации и осцилляции. Поскольку с помощью разработанного ПЛУ-СВ-01 удалось измерить скорости распространения сдвиговых волн в образцах толщиной менее 3,00 мм, и в образцах с сильным затуханием, в которых невозможно было идентифицировать импульс сдвиговой волны классической методикой, то

динамические модули упругости и коэффициент Пуассона удалось рассчитать даже для них.

Поскольку лабораторные исследования с помощью разработанного преобразователя показали перспективность его дальнейшего использования при проведении лазерно-ультразвуковой диагностики, целесообразным являлось повысить его эргономичность. В качестве оптико-акустического генератора была применена плоскопараллельная пластина сине-зеленого стекла СЗС-22. Широкополосный акустический приемник был выполнен из ПВДФ-пленки (пленка на основе полиэтилена высокого давления) толщиной 50 мкм, обеспечивающий регистрацию полезных импульсов полосой частот 0,1 – 16 МГц. Приемник электродами соединяется с передающей платой усилителя импульсов, которая оснащена BNC-разъемом для передачи сигналов в блок обработки сигналов дефектоскопа УДЛ-2М. 3D-модель и фотография модернизированного преобразователя сдвиговых волн, которому был присвоен шифр – ПЛУ-СВ-02 – «Преобразователь Лазерно-Ультразвуковой – Сдвиговые Волны – Версия №2» приведены на рис. 15. и на рис. 16 соответственно.

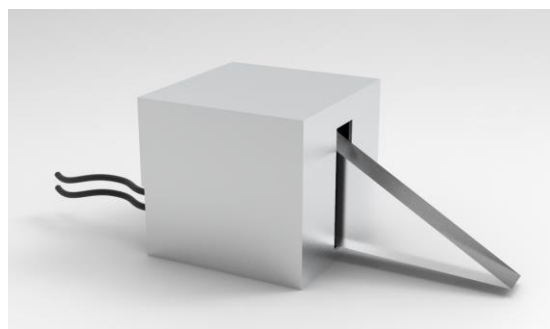
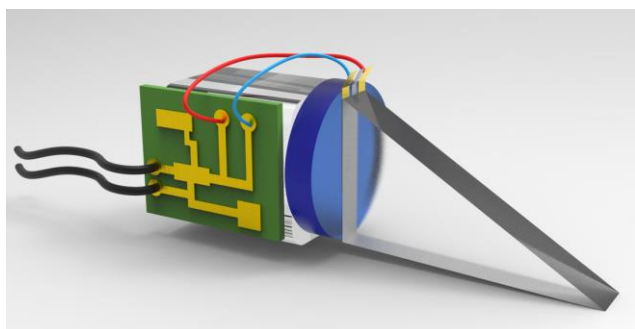


Рисунок 15 – 3D-модель преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01

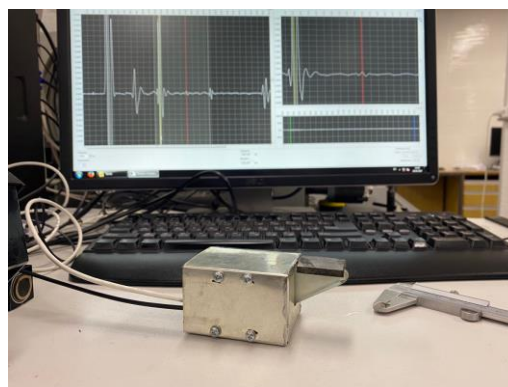
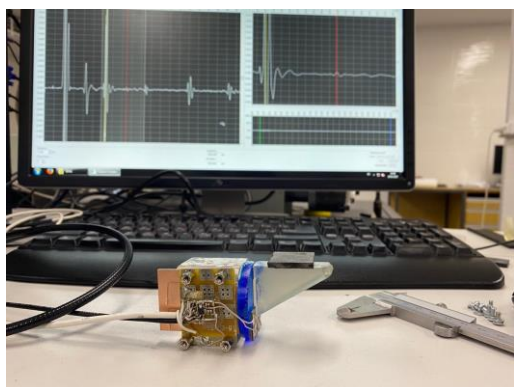


Рисунок 16 – Фотография преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи разработки метода генерации широкополосных лазерно-ультразвуковых импульсов сдвиговых волн с целью осуществления прецизионного расчета скоростей данного типа волн в образцах горных пород, что имеет существенное значение для правильного определения динамических упругих параметров горных пород.

Основные научные и практические результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1) Проведены анализ и систематизация отечественного и зарубежного опыта по созданию преобразователей сдвиговых волн;

2) В программном пакете COMSOL Multiphysics выполнено компьютерное моделирование процесса распространения широкополосных импульсов продольной упругой волны в среде преобразователя и полной ее трансформации в сдвиговую на границе «изотропное твердое тело – воздух»;

3) На основе результатов численных расчетов и компьютерного моделирования спроектирован и изготовлен лазерно-ультразвуковой преобразователь широкополосных импульсов сдвиговых упругих волн, проведена апробация его работы на модельных образцах стекла, нержавеющей стали и алюминия;

4) Построены дисперсионные кривые зависимости фазовых скоростей от частоты в исследованных модельных образцах. Определен частотный диапазон работы преобразователя, при котором значения фазовых и групповых скоростей совпадают;

5) Выявлены ограничения в работе классического лазерно-ультразвукового преобразователя продольных волн при исследовании образцов горных пород;

6) Выполнена серия измерений распространения скоростей сдвиговых волн в образцах горных пород различного генотипа с помощью разработанного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн;

7) Определены частотные диапазоны работы разработанного преобразователя при исследовании горных пород различной толщины, при котором значения фазовых и групповых скоростей различаются менее чем на 1 %;

8) Определены значения динамических модулей упругости и коэффициента Пуассона для исследованных горных пород;

9) Выполнена модернизация разработанного преобразователя и определены конструктивные решения для повышения его эргономичности.

Полученные результаты показывают перспективность комплексирования измерений с помощью классических методов ЛУД и разработанного широкополосного преобразователя сдвиговых упругих волн при исследовании гетерогенных материалов.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

**В изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ:**

1. *Иванов П. Н.*, Безруков В. И. Экспериментальное исследование упругих свойств углей различной степени тектонической нарушенности методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021, № 4-1, с. 26-40. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_26.

2. *Иванов П. Н.* Разработка широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн и его апробация на изотропных материалах и образцах горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023, № 4, с. 35–47. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_4\_0\_35.

**В изданиях, индексируемых наукометрической базой Scopus:**

3. 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, Volume 9, Issue 9, pp. 84-92.

4. Kravcov A., Cherepetskaya E., Svoboda P., Blokhin, D., *Ivanov P.*, Shibaev I. Thermal infrared radiation and laser ultrasound for deformation and water saturation effects testing in limestone // Remote Sensing12 (24). – 2020 г., статья № 4036, pp. 1-14 DOI: 10.3390/rs12244036.

5. Blokhin D.I., *Ivanov P.N.*, Dudchenko, O.L. Experimental study of thermomechanical effects in water-saturated limestones during their deformation // Journal of Mining Institute. – 2021, 247(1), pp. 3–11. DOI:10.31897/PMI.2021.1.1.

**В прочих изданиях:**

6. *Иванов П.Н.* Прецизионное измерение скоростей распространения сдвиговых волн в изотропных материалах и образцах горных пород на основе лазерно-ультразвуковой диагностики // Актуальные вопросы современной науки: теория, методология, практика, инноватика. Сборник научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции (30 мая 2023 г., г. Уфа) – 2023. – Ч.1 – с. 123-129.