

На правах рукописи

Белов Михаил Алексеевич



УДК 622.611.4:620179.16

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ И ПОРИСТОСТИ
ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

**Специальность 25.00.20 - «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»**

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва 2005

Работа выполнена в Московском государственном горном университете

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент Черепецкая Елена Борисовна

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Зильбершмидт Михаил Григорьевич
кандидат технических наук Тавостин Михаил Николаевич

Ведущее предприятие:
Институт проблем комплексного освоения недр РАН

Защита диссертации состоится «20» декабря 2005 г в 14.00 ч на заседании диссертационного совета Д-212.128.05 в Московском государственном горном университете по адресу:
119991, Москва, Ленинский проспект, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного горного университета

Автореферат разослан «18» ноября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
профессор, доктор технических наук



Крюков Г.М.

2006-4
23476

2224096

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Наличие надежной и оперативной информации о свойствах и структуре горных пород на различных масштабных уровнях является необходимым условием эффективной и безопасной добычи и переработки полезных ископаемых, строительства и эксплуатации подземных сооружений.

При проведении исследований на образцах, блоках и относительно небольших участках массива среди геофизических методов наиболее перспективны так называемые ультразвуковые методы, основанные на анализе характеристик упругих волн, распространяющихся в геосреде. Сегодня эти методы используются для решения чрезвычайно широкого круга задач геоконтроля, связанных с оценкой практически всего спектра физико-механических свойств горных пород. Особое значение имеет практика ультразвуковых исследований тонкой структуры геоматериалов, в частности концентрации и размеров содержащихся в них неоднородностей в виде зерен и пор. Это связано с тем, что зернистость и пористость во многом определяют прочностные и упругие свойства горных пород, а также их проницаемость.

Для оценки параметров зернистой структуры и пористости геоматериалов перспективно использование одного из вариантов ультразвукового метода – широкополосной ультразвуковой спектроскопии. Однако потенциальные возможности последней до настоящего времени практически не реализуются из-за нерешенности проблем возбуждения в геоматериалах упругих импульсов с амплитудой давления от 1 МПа в частотном диапазоне 0,3-30 МГц. Таким образом, разработка лазерного ультразвукового метода и аппаратуры для изучения свойств и структурных неоднородностей горных пород, обеспечивающих повышение информативности и надежности контроля параметров их зернистой структуры и пористости, является актуальной научной задачей.

Исследования, результаты которых представлены в настоящей диссертационной работе, осуществлялись при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ-1467.2003.5). Они были проведены в рамках темы «Теоретическое и экспериментальное обоснование изучения структуры, свойств и состояния горных пород на основе принципов ультразвуковой эхоскопии» в соответствии с планом научно-исследовательских работ МГТУ, проводимых в 2002-2004 гг.



по заданию Федерального агентства по образованию (номер государственной регистрации 01200304882).

Цель работы заключается в установлении взаимосвязи между параметрами зернистой структуры и пористости геоматериалов, с одной стороны, и спектральными характеристиками упругих волн, распространяющихся в них - с другой, для разработки лазерного оптико-акустического метода экспресс-оценки указанных параметров, позволяющего повысить информативность и надежность контроля структуры горных пород.

Идея работы заключается в использовании закономерностей распространения и трансформации лазерно-индуцированных ультразвуковых импульсов в геоматериалах для установления параметров их зернистой структуры и пористости.

Научные положения, разработанные лично соискателем, и новизна:

- Впервые установлено, что размеры минерального зерна горных пород могут быть определены путем анализа частотной зависимости коэффициента затухания упругих волн в трех областях, в первой из которых он пропорционален четвертой степени частоты; во второй – пропорционален квадрату частоты; в третьей – не зависит от частоты; при этом границы между первой и второй областями, второй и третьей областями, а также середина второй области характеризуют, соответственно, максимальный, минимальный и средний размеры зерен в породе.

- Впервые показано, что коэффициент объемной пористости горных пород связан квадратичной зависимостью с величиной нормированной мощности структурных шумов, возникающих при ультразвуковой спектроскопии образцов в диапазоне частот 0,3-30 МГц, что позволяет определять указанный коэффициент, используя результаты измерений мощности структурных шумов.

- Впервые установлено, что необходимый для ультразвуковой микроструктурной диагностики образцов горных пород диапазон частот упругих волн 0,3-30 МГц может быть обеспечен на основе использования для их возбуждения термоупругого эффекта, возникающего при взаимодействии лазерного лучка с поверхностью горной породы; при этом возникают импульсы упругих волн длительностью порядка 100 нс с амплитудой давления до 10 МПа.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- использованием при проведении ультразвуковой микроструктурной диагностики горных пород современного аппаратного обеспечения, обеспечивающего погрешность измерений не более 1%, и широко опробованных компьютерных программ для обработки полученных экспериментальных данных;
- воспроизводимостью результатов измерений параметров зернистой структуры и пористости пород по предложенному способу с погрешностью не более 5% при вероятности $P=0,95$;
- сходимостью результатов структуроскопии геоматериалов, полученных оптико-акустическими и наиболее эффективными традиционными методами, с относительным отклонением, не превышающим 9%.

Научное значение работы заключается в установлении взаимосвязи между параметрами зернистой структуры и пористости геоматериалов, с одной стороны, и спектральными характеристиками упругих волн, распространяющихся в них - с другой.

Практическое значение работы заключается в разработке «Методики лазерного ультразвукового исследования свойств и структуры горных пород на образцах», утвержденной в Московском государственном горном университете, а также в создании аппаратного обеспечения для ее реализации. Внедрение данной методики и аппаратуры позволит значительно повысить информативность и надежность контроля параметров зернистой структуры и пористости горных пород.

Реализация результатов работы. Выводы и рекомендации, сформулированные в работе, вошли в «Методику лазерного ультразвукового исследования свойств и структуры горных пород на образцах», которая направлена в научно-исследовательские институты, вузы и другие организации для практического использования.

Апробация работы. Основные результаты работы в период выполнения докладывались и обсуждались в работе XII Международной научной школы им. академика С.А. Христиановича (Симферополь, 2002 г), на XXI сессии Российского акустического общества (Москва, 2003 г), симпозиуме «Неделя горняка-2004» и научных семинарах кафедры ФТКП Московского государственного горного университета.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 10 таблиц, 34 рисунка и список литературы из 120 наименований.

Основное содержание работы

Глава 1 диссертационной работы посвящена анализу современного состояния и проблем ультразвуковой спектроскопии геоматериалов. В рамках этого анализа рассмотрены особенности минерального зерна и пор как элементов структуры горных пород, а также рассмотрены имеющиеся данные о влиянии геометрических параметров зерен и пор на важнейшие физико-механические свойства геоматериалов. Выявлено, что имеющиеся на сегодняшний день взаимосвязи размеров зерна и значений объемной пористости пород с их физическими свойствами носят преимущественно качественный характер. Что же касается перехода к количественным оценкам, то он затруднен прежде всего из-за несовершенства методов, традиционно используемых для анализа параметров зернистой структуры геоматериалов и диагностики их объемной пористости. К ним прежде всего относятся оптическая микроскопия и анализ пористости на основе измерений средней и истинной плотности. Трудоемкость вышеуказанных методов исключает получение необходимого статистического материала в достаточном объеме. Принципиальным недостатком микроскопии является анализ структуры образца породы лишь в некотором ее сечении, что не позволяет получать интегральных оценок на достаточно представительной базе контроля. При этом метод измерения пористости, основанный на анализе средней и истинной плотности породы, наоборот, позволяет получить лишь интегральное значение объемной пористости исследуемого образца, не позволяя производить ее локальной диагностики, что, учитывая статистическую неоднородность геоматериалов, представляется принципиально важным.

Освоение геоакустикой ультразвукового диапазона частот упругих волн, длина которых соизмерима с размерами минерального зерна и пор, делает перспективным использование частотнозависимого коэффициента затухания ультразвука в качестве основного информативного параметра, используемого для интегральной экспресс-структуроскопии геоматериалов.

Основными предпосылками для решения этой и других задач геоакустики являлись результаты исследований, произведенных в разные годы Ватолиным Е.С., Вопилкиным А.Х., Горбацевичем Ф.Ф., Даниловым В.Н., Домаркосом

В.П., Ермоловым И.Н., Королевым М.В., Кикучи Е., Левыкиным А.И., Лепендиным Л.Ф., Меркуловым Л.Г., Меркуловой В.М., Носовым В.Н., Рубаном А.Д., Черепецкой Е.Б., Шкуратником В.Л., Ямщиковым В.С., Biot M.A., Murphy W.P., White J.E. и другими отечественными и зарубежными учеными.

Произведенный анализ показал, что основной нерешенной проблемой ультразвуковой спектроскопии горных пород является невозможность возбуждения необходимых для этого мощных широкополосных упругих импульсов ввиду несовершенства пьезоэлектрических преобразователей, традиционно используемых для генерации ультразвука. В связи с этим представляется перспективным использование лазерного термооптического возбуждения звука – оптико-акустического эффекта.

Оптико-акустический эффект заключается в следующем. При поглощении некоторой средой переменного светового потока в этой среде вследствие неравномерного нагрева возникают упругие импульсы. Мощные импульсные лазеры, работающие в режиме модуляции добротности, могут излучать импульсы с характерной длительностью от миллисекунд до пикосекунд, что позволяет возбуждать в поглощающих средах упругие импульсы, имеющие частотный диапазон от 10 кГц до 100 МГц и амплитуду давления до 10 МПа. Однако возможность применения лазерно-индуцированного ультразвука к структуроскопии геоматериалов неразрывно связана с задачей возбуждения оптико-акустических импульсов непосредственно в геоматериалах. Как показал произведенный анализ, к настоящему времени эта задача решена лишь теоретически. Мало того - отсутствуют методики оптико-акустических измерений в горных породах, а также не решен ряд других задач теоретического, экспериментального, методического и аппаратного характера, связанных с созданием лазерного ультразвукового метода диагностики геоматериалов.

В заключение первой главы работы сформулированы основные задачи диссертационных исследований:

– Разработка принципов построения и создание образца широкополосной аппаратуры, обеспечивающей возможность ультразвуковой спектроскопии горных пород в диапазоне 0.3-30 МГц на основе принципа термооптического возбуждения упругих волн;

- Выбор теоретической модели, описывающей взаимосвязь между параметрами зернистой структуры породы и частотнозависимым коэффициентом затухания ультразвука в ней;
- Экспериментальное установление взаимосвязи между параметрами зернистой структуры породы и частотнозависимым коэффициентом затухания ультразвука в ней в различных диапазонах частот;
- Установление эмпирической взаимосвязи между объемной пористостью горных пород и величиной нормированной мощности структурных шумов, возникающих при ультразвуковой эхоскопии объектов контроля.

Во второй главе содержится теоретическое обоснование возможности использования лазерной ультразвуковой спектроскопии для оценки параметров зернистой структуры и диагностики пористости горных пород.

Пусть из прозрачной среды на границу раздела (плоскость XU) с поглощающей средой падает лазерный импульс с интенсивностью $I=I_0f(t)g(x,y)$, где $f(t)$ и $g(x,y)$ описывают соответственно временную огибающую лазерного импульса и поперечное распределение интенсивности оптического пучка, I_0 – максимальное значение интенсивности. Ось z направлена вглубь поглощающей среды (рис. 1).

За счет неоднородного нагрева при поглощении лазерного излучения среда расширяется, и в ней возникает импульс давления.

Данный процесс описывается уравнением:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c_l^2 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{\mu c_l^2 \beta}{c_p} e^{-\mu z} \frac{dI}{dt}, \quad (1)$$

где p – приращение давления в ультразвуковой волне, c_l – скорость продольной волны, μ – коэффициент поглощения света, β – коэффициент теплового расширения, c_p – удельная теплоемкость в среде генератора ультразвуковых импульсов, I – зависящая от времени интенсивность лазерного излучения, $z > 0$.

Решение данного уравнения имеет вид:

$$p(\tau) = \frac{\mu c_l^2 \beta^* I_0}{4\pi c_p} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(\omega) K(\omega) e^{-i\omega\tau} d\omega, \quad (2)$$

где $\tau = t - z/c_l$ – время в бегущей системе координат, $\tilde{f}(\omega)$ – частотный спектр временной огибающей интенсивности лазерного импульса, $K(\omega)$ – передаточная функция поглощающей свет среды, где $\beta^* = \beta(1 - 4c_l^2/3c_p^2)$ – эффективный коэффициент теплового расширения поглощающей среды; β , c_p , c_l –

соответственно коэффициент теплового расширения, скорости сдвиговой и продольной волн.

Таким образом, спектр $p(\omega)$ импульса давления, возникающего в поглощающей среде за счет термооптического преобразования, есть произведение спектра временной огибающей интенсивности лазерного импульса $I_0 \tilde{f}(\omega)$ и передаточной функции $K(\omega)$:

$$p(\omega) = \frac{\mu c_1^2 \beta' I_0}{4\pi p} \tilde{f}(\omega) K(\omega). \quad (3)$$

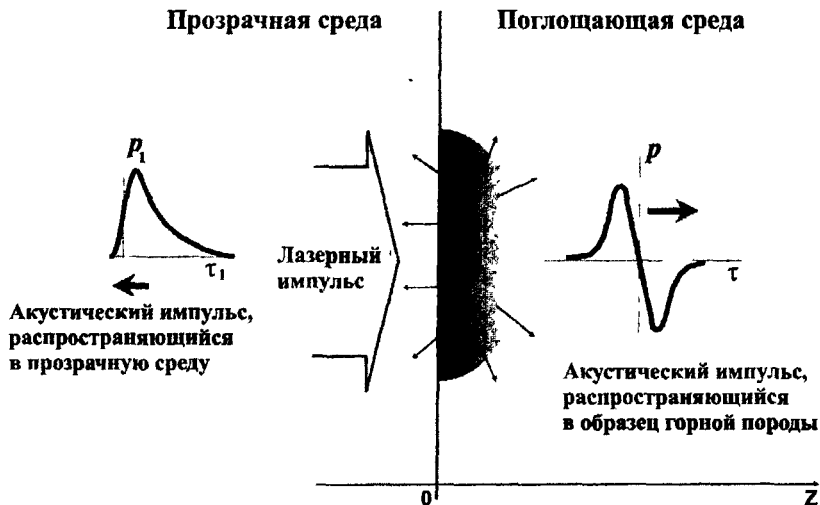


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая принцип лазерного термооптического возбуждения упругих волн; $p(\tau)$, $p_1(\tau_1)$ - зависимость избыточного давления от времени в бегущей системе координат

В случае когда акустический импеданс прозрачной среды выше, чем поглощающей (т.н. случай жесткой границы), передаточная функция термооптического преобразования будет иметь вид

$$K_r(\omega) = \frac{1}{1 + (\omega/\mu c_1)^2}. \quad (4a)$$

В противном случае (при свободной границе) передаточная функция примет вид

$$K_f(\omega) = \frac{-i\omega/\mu c_1}{1 + (\omega/\mu c_1)^2}. \quad (4б)$$

Анализ приведенных зависимостей показывает, что низкочастотная часть спектра оптико-акустического сигнала возбуждается при жесткой границе, а высокочастотная – при свободной границе раздела между прозрачной и поглощающей средами.

Оценки параметров оптико-акустических сигналов, возбуждаемых импульсным лазером, работающим на длине волны $\lambda = 1.06$ мкм и имеющим длительность импульса $\tau_0 = 12$ нс, показывают, что в генераторных средах с коэффициентом поглощения света порядка 150 см^{-1} возможно возбуждение импульсов упругих волн общей протяженностью не более 200 нс, при ширине спектрального диапазона 30 МГц. В ряде генераторных сред амплитуда возбуждаемых импульсов может достигать 10 МПа. Импульсы с такими характеристиками позволяют обнаруживать неоднородности структуры исследуемых пород с характерными размерами 50 мкм - 5 мм.

Из соотношений (1)-(4) следует, что параметры термооптически возбуждаемых упругих импульсов зависят от коэффициента поглощения лазерного излучения в генераторной среде. Если эта величина неизвестна, то определение временной формы и спектра возбуждаемого импульса не представляется возможным. Таким образом, необходимым условием проведения оптико-акустической спектроскопии геоматериалов при генерации зондирующих импульсов в исследуемой породе является информация о коэффициенте поглощения оптического излучения в этой породе на длине волны лазерного источника. В связи с этим был предложен алгоритм расчета этой величины на основе результатов оптико-акустических измерений.

Временная форма переднего фронта оптико-акустического сигнала, возбуждаемого в поглощающей среде, описывается следующим выражением:

$$p(\tau = t - z/c_l) = p_0 \exp(\mu c_l \tau), \quad \tau > 0. \quad (5)$$

Здесь t - время, z - координата, вдоль которой распространяется волна, c_l - скорость распространения продольных волн, τ - время в бегущей системе координат, p_0 - амплитуда давления. Однако, проходя через образец, ультразвуковой импульс испытывает рассеяние на неоднородностях и дифрагирует. Передний фронт волны соответственно искажается, и экспериментально полученная форма акустического сигнала не несет нужной информации о коэффициенте затухания. Для того что бы исключить влияние дифракции и затухания на форму импульса, было предложено экспериментально определить частотную зависимость этих величин для исследуемого образца геоматериала и, применяя методы спектрального

анализа, восстановить исходную временную форму оптико-акустического импульса, возбуждаемого в исследуемой породе. Коэффициент поглощения оптического излучения определяется из (5).

Измерения, проведенные в образцах железистого кварцита, показали, что величина коэффициента поглощения оптического излучения в них составляет $80-90 \text{ см}^{-1}$, а разброс значений измеряемой величины от точки к точке образцов достигает 7 см^{-1} .

При экспериментальном исследовании внутренней структуры геоматериалов, в частности определении параметров их зернистой структуры и пористости, особый интерес вызывают теоретические модели, связывающие динамические параметры упругих волн в горной породе с характерными размерами содержащихся в ней неоднородностей. Произведенный в главе 2 анализ показал, что применительно к экспериментальному исследованию параметров зернистой структуры пород наиболее оптимальной является модель анизотропного кристалла, в которой рассматривается однократное рассеяние на сферических зернах, находящихся в упругой матрице. В рамках данной модели удалось связать характерные размеры зерен с частотной зависимостью коэффициента затухания ультразвука в исследуемом геоматериале. Были выделены три характерные частотные области рассеяния ультразвука. Первая область, в которой длина волны значительно больше, чем средний размер зерна, соответствует релеевскому рассеянию, а коэффициент затухания ультразвука в ней пропорционален четвертой степени частоты. Для области стохастического или диффузного рассеяния, когда длина волны становится сравнима со средним размером зерна ($\lambda \cong \bar{A}$), наблюдается квадратичная зависимость коэффициента затухания продольных волн от частоты. И, наконец, в третьей области, когда средний размер зерна значительно больше длины волны ультразвука (так называемая область геометрической акустики), коэффициент затухания перестает зависеть от частоты. При этом граничные частоты между этими областями связаны с характерными размерами зерен достаточно простыми соотношениями:

$$2\pi f_0 A_{\max} / c_l \sim 1, \quad (6)$$

$$\frac{2\pi f \bar{A}}{c_l} \sim 1, \quad (7)$$

где A_{\max} и \bar{A} - соответственно, максимальный и средний размер неоднородностей в исследуемом образце, c_l - скорость продольных

ультразвуковых волн в нем, \bar{f} - частота, соответствующая середине зоны стохастического рассеяния, а f_0 - частота перехода от релеевского к стохастическому рассеянию.

При анализе существующих теоретических моделей, связывающих параметры упругих волн в породе и их пористость, была показана возможность применения к геоматериалам соотношений, описывающих связь скорости распространения упругих волн и пористости в металлах:

$$c_l = c_0 \sqrt{(1 - P^{2/3})}. \quad (8)$$

Здесь c_l - скорость продольных звуковых волн в пористом образце, c_0 - скорость звука в металле при отсутствии пор, P - объемная пористость образца. Однако, ввиду значительной неоднородности геоматериала, величина c_0 в них будет сильно зависеть от концентрации тех или иных компонентов их твердой фазы. Теоретический анализ показал, что в породе с двухкомпонентной твердой фазой пористость геоматериала будет связана со скоростью распространения упругих волн в породе соотношением:

$$P = \sqrt{(1 - c_l^2 (n\rho_1 + (1-n)\rho_2) (\frac{n}{\rho_1 c_1^2} + \frac{(1-n)}{\rho_2 c_2^2}))^3}, \quad (9)$$

где ρ_1 и ρ_2 - плотности фракций, слагающих твердую фазу исследуемой породы, n - концентрация первой фракции, а c_1 и c_2 - скорости распространения упругих волн в первой и второй фракциях соответственно. При этом выражения, аналогичные (9), можно получить для породы с любым количеством компонент в твердой фазе.

Следует, однако, отметить, что использование выражения (9) для определения пористости пород возможно лишь в случае, когда известны параметры ρ , n , c . В противном же случае применение аналитических выражений для определения величины объемной пористости геоматериала не представляется возможным. В связи с этим в главе 2 была показана целесообразность нахождения корреляционной связи между пористостью породы и какой-либо экспериментально измеряемой физической величиной. В качестве такой величины была выбрана полная нормированная мощность W шумовой компоненты оптико-акустического сигнала, рассеянного «назад» на неоднородностях структуры образца:

$$W = \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} [S(f) - S_0(f)]^2 df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_0^2(f) df} \quad (10)$$

Здесь $S(f)$ и $S_0(f)$ соответственно гладкая и осциллирующая части спектра прошедшего образец оптико-акустического импульса (см. рис. 2), f_{\min} и f_{\max} - граничные частоты рабочего диапазона измерений.

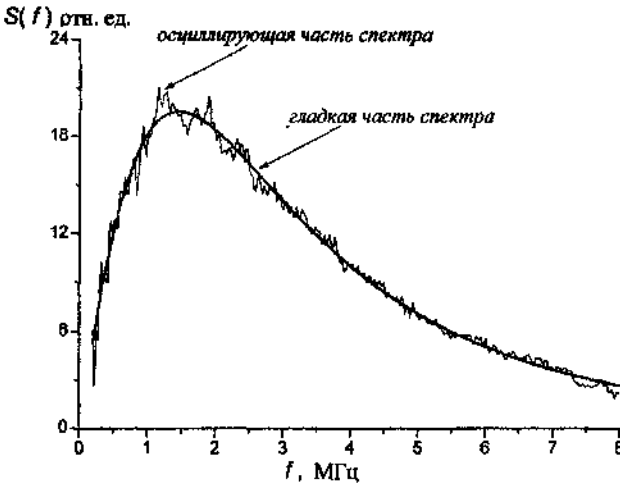


Рис. 2. Совокупность гладкой и осциллирующей частей спектра оптико-акустического сигнала, прошедшего через образец геоматериала

Глава 3 диссертационной работы посвящена разработке аппаратного и методического обеспечения лазерных ультразвуковых измерений в геоматериалах.

Для решения задачи широкополосной ультразвуковой структуроскопии геоматериалов предлагается использовать лазерно-ультразвуковую систему, блок-схема которой приведена на рис. 3. Источником оптического излучения является твердотельный лазер на основе алюмо-итриевого граната с импульсной накачкой, работающий на длине волны 1064 нм с частотой следования импульсов до 10 Гц, длительностью импульсов 12 нс и энергией в импульсе до 0,26 Дж. Для регулировки мощности оптического излучения, падающего на оптико-акустический генератор, применяется набор светофильтров. Использование собирающих или рассеивающих линз позволяет

варьировать размер облучаемой области на ОА-генераторе в пределах от 0,3 мм до 20 мм.

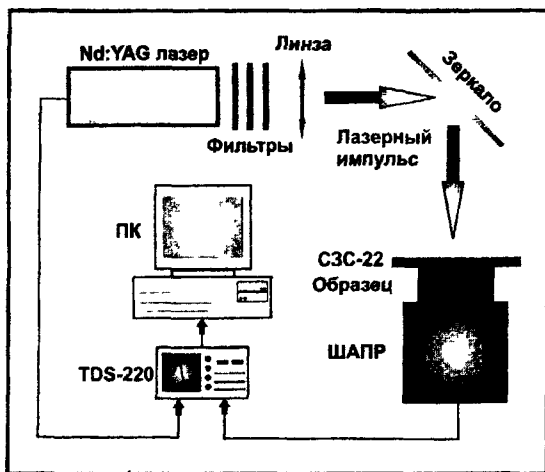


Рис. 3. Блок-схема лазерной ультразвуковой системы структуроскопии геоматериалов

Оптико-акустическая ячейка представляет собой совокупность оптико-акустического генератора на основе пластины СЗС-22 и широкополосного акустического приемника (ШАПР). Исследуемый образец помещается между ними. При необходимости возбуждения упругих импульсов непосредственно в образце генератор демонтируется. Возбуждаемый лазером ультразвуковой импульс проходит образец и фиксируется широкополосным приемником. Сигнал с приемника передается на цифровой осциллограф, а затем – на персональный компьютер, где происходит его обработка с использованием специализированного программного обеспечения.

Наряду с описанной выше оптико-акустической ячейкой с прямой регистрацией сигнала применялась ячейка с косвенной регистрацией (см. рис. 4). Ее основой является прозрачная призма, в которую под углом вводится лазерный импульс. Призма находится в акустическом контакте с образцом. Пройдя через призму, лазерный луч падает на поверхность образца, возбуждая в нем широкополосный ультразвуковой импульс. Этот импульс распространяется как вглубь образца, испытывая при этом рассеяния на неоднородностях структуры последнего, так и в призму. Импульс, идущий в призму, называют эталонным, а импульс, идущий в образец, – зондирующим.

Та часть зондирующего импульса, которая рассеялась в направлении, противоположном его распространению, вслед за эталонным импульсом попадает в призму, проходит ее и фиксируется широкополосным акустическим приемником.

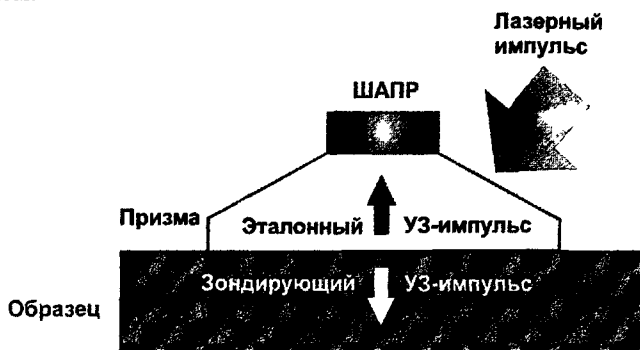


Рис. 4. Оптико-акустическая ячейка с косвенной регистрацией сигнала

Принципиальная схема широкополосного приемника приведена на рис. 5. Чувствительным элементом 1 приемника являются кристалл ниобата лития (LiNbO_3) или ПВДФ-пленка, находящиеся в акустическом контакте с мембраной-звукоприемником 2. Мембрана и чувствительный элемент помещены в металлический корпус 3, который одновременно выполняет функции заземления. Электрический сигнал формируется на электроде 4, находящемся в контакте с пьезоэлементом. Для передачи сигнала на внешние устройства имеется байонетный разъем 5. Используемые в системе приемники имеют рабочий диапазон частот 0,3–40 МГц, апертуру 20–50 мм и динамический диапазон 60 дБ.

Основные технические характеристики лазерной ультразвуковой системы структуроскопии геоматериалов:

Рабочая полоса частот	0,1–45 МГц
Максимальная амплитуда зондирующих импульсов	10 МПа
Порог детектирования	5 Па
Диаметр ультразвукового пучка	0,3–20 мм
Диапазон измеряемых значений коэффициента затухания	0,01–20 см^{-1}

Общая методика оптико-акустических измерений заключалась в следующем. Образцы изготавливались в виде плоскопараллельных пластин толщиной 4-8 мм. Акустический контакт между элементами оптико-акустической ячейки обеспечивался водной или вазелиновой склейкой. Скорость звука измерялась по задержке между приходом на осциллограф лазерного импульса и сигнала с пьезоприемника. Частотнозависимый коэффициент затухания ультразвука в образце определялся из выражения

$$\alpha(f) = \frac{1}{L} \ln \frac{S_0(f)}{S(f)}, \quad (11)$$

где L – толщина образца, $S_0(f)$ – спектр зондирующего импульса, а $S(f)$ – спектр импульса, прошедшего образец.

Глава 4 посвящена экспериментальной проверке лазерного оптико-акустического метода структуроскопии геоматериалов.

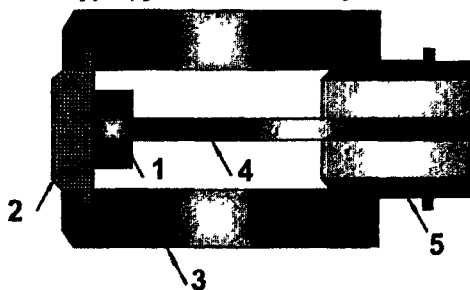


Рис. 5. Принципиальная схема широкополосного акустического приемника

На основе изложенной в главе 2 теоретической модели, связывающей частотную зависимость коэффициента затухания упругих волн и характерный размер зерна исследуемой породы, была произведена серия оптико-акустических измерений параметров зернистой структуры железистых кварцитов, мраморов и гранитов. Расчет характерных размеров зерен исследуемых пород производился с помощью выражений (7), (8). При этом зависимость коэффициента затухания от частоты (см. рис. 6) определялась экспериментально с использованием соотношения (11). На основе сравнения результатов оптико-акустических измерений и оптико-микроскопического анализа было установлено, что лазерно-ультразвуковая система позволяет выявлять в породе неоднородности с характерным размером от 30 мкм до 1 мм, при этом относительная погрешность измерений падает с увеличением размера неоднородностей.

Связь объемной пористости геоматериалов с мощностью шумовой компоненты оптико-акустического сигнала в них была экспериментально проверена на образцах вулканического базальта, известняка и песчаника. Измерения проводились с помощью оптико-акустической ячейки с косвенной регистрацией сигнала, мощность шумовой компоненты определялась из выражения (10).

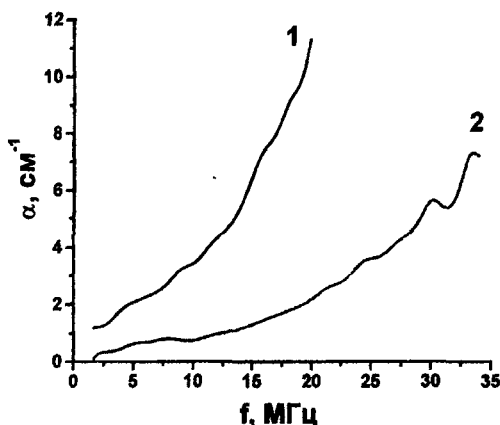


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента затухания ультразвука в первом (1) и втором (2) образцах железистых кварцитов

Было установлено, что полученные экспериментальные кривые хорошо аппроксимируются квадратичной зависимостью вида $P=A*W^2+B*W+C$, где P – пористость, а W – мощность структурного шума (см. рис. 7). Коэффициенты A , B и C для различных пород были определены из соответствующих экспериментальных зависимостей $P(W)$. При этом было обнаружено, что при увеличении объемной пористости образцов, принимавших участие в экспериментах, их структура становится все более неоднородной, что выражается в большом разбросе значений мощности структурного шума W в различных точках одного и того же образца.

С помощью лазерно-ультразвуковой системы структуроскопии геоматериалов были реализованы оптико-акустические измерения скорости продольных и сдвиговых упругих волн в образцах породы малых размеров. В экспериментах использовались образцы известняка, мрамора и железистого кварцита толщиной от 4 мм до 30 мм. Результаты оптико-акустических

измерений в образцах толщиной 30 мм сравнивались с данными, полученными с помощью ультразвукового дефектоскопа УД2-12; при этом различия в полученных значениях скоростей упругих волн составили порядка 1% от измеряемой величины.

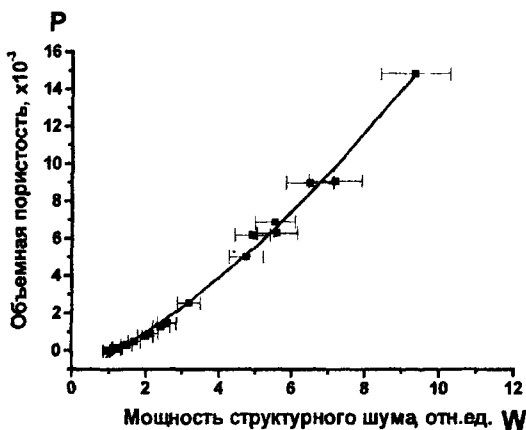


Рис. 7. Зависимость мощности структурного шума в базальте от пористости.

Наконец, в главе 4 диссертационной работы была сформулирована методика оптико-акустических измерений параметров зернистой структуры и пористости в горных породах. В указанной методике были приведены требования к экспериментальным образцам и определен порядок обработки экспериментальных данных. Помимо этого, проанализированы основные факторы, влияющие на погрешность измерений, и даны рекомендации по уменьшению указанного влияния. Разработанная методика направлена в научно-исследовательские институты, вузы и другие организации, ведущие работы по созданию и практическому применению новых методов исследования геоматериалов.

Заключение

Диссертационная работа является научно-квалификационной работой, в которой дано новое решение научной задачи разработки лазерного ультразвукового метода и аппаратуры для изучения свойств и структурных неоднородностей горных пород, обеспечивающих повышение информативности и надежности контроля параметров их зернистой структуры

и пористости, что позволяет повысить эффективность геоконтроля и безопасность горных работ.

Основные выводы по работе, полученные автором, заключаются в следующем:

1. Разработаны принципы построения аппаратуры лазерной ультразвуковой структуроскопии геоматериалов. Экспериментально установлено, что на основе оптико-акустического преобразования возможно возбуждение в горных породах импульсов упругих волн с длительностью порядка 100 нс, амплитудой давления до 10 МПа, в частотном диапазоне до 30 МГц, что позволяет исследовать геологические среды с коэффициентом затухания ультразвука, достигающим 20 см^{-1} .
2. Установлено, что теоретическая модель, учитывающая релеевское, стохастическое и диффузное рассеяние ультразвука на зернах, позволяет определять их характерные размеры в исследуемой породе на основе экспериментально измеренной зависимости коэффициента затухания упругих волн от частоты.
3. Показано, что полная нормированная мощность шумовой компоненты оптико-акустического сигнала, возбуждаемого в геоматериале и рассеиваемого «назад» на его порах, связана с объемной пористостью породы квадратичной зависимостью в диапазоне значений пористости 0,01-0,16. Установлено, что использование данной зависимости в качестве градуировочной кривой позволяет производить экспресс-оценку локальной пористости горных пород при наличии лишь одностороннего доступа к исследуемому образцу.
4. Установлено, что при осуществлении лабораторных измерений скоростей распространения упругих волн в геоматериалах на образцах с характерными размерами 5-30 мм целесообразно использование лазерно-индуцированных ультразвуковых импульсов, применение которых обеспечивает относительную погрешность измерений не более 3%.
5. Доказано, что лабораторный анализ характерных размеров зерен породы и коэффициента ее объемной пористости предпочтительно производить с помощью термооптически генерированных ультразвуковых импульсов в спектральном диапазоне 0,3-30 МГц, используя образцы в виде плоскопараллельных пластин с характерной толщиной 3-10 мм. Указанный способ дает возможность определять исследуемые величины с относительной погрешностью не более 10%.

6. По результатам проведенных исследований разработана утвержденная в Московском государственном горном университете «Методика лазерного ультразвукового исследования свойств и структуры горных пород на образцах», обеспечивающая возможность контроля геоматериалов с повышенным затуханием упругих волн, внедрение которой позволит значительно повысить информативность и надежность определения параметров зернистой структуры и пористости.
7. Указанная методика передана в научно-исследовательские институты, вузы и другие организации, ведущие работы по созданию и практическому применению новых методов исследования геоматериалов.

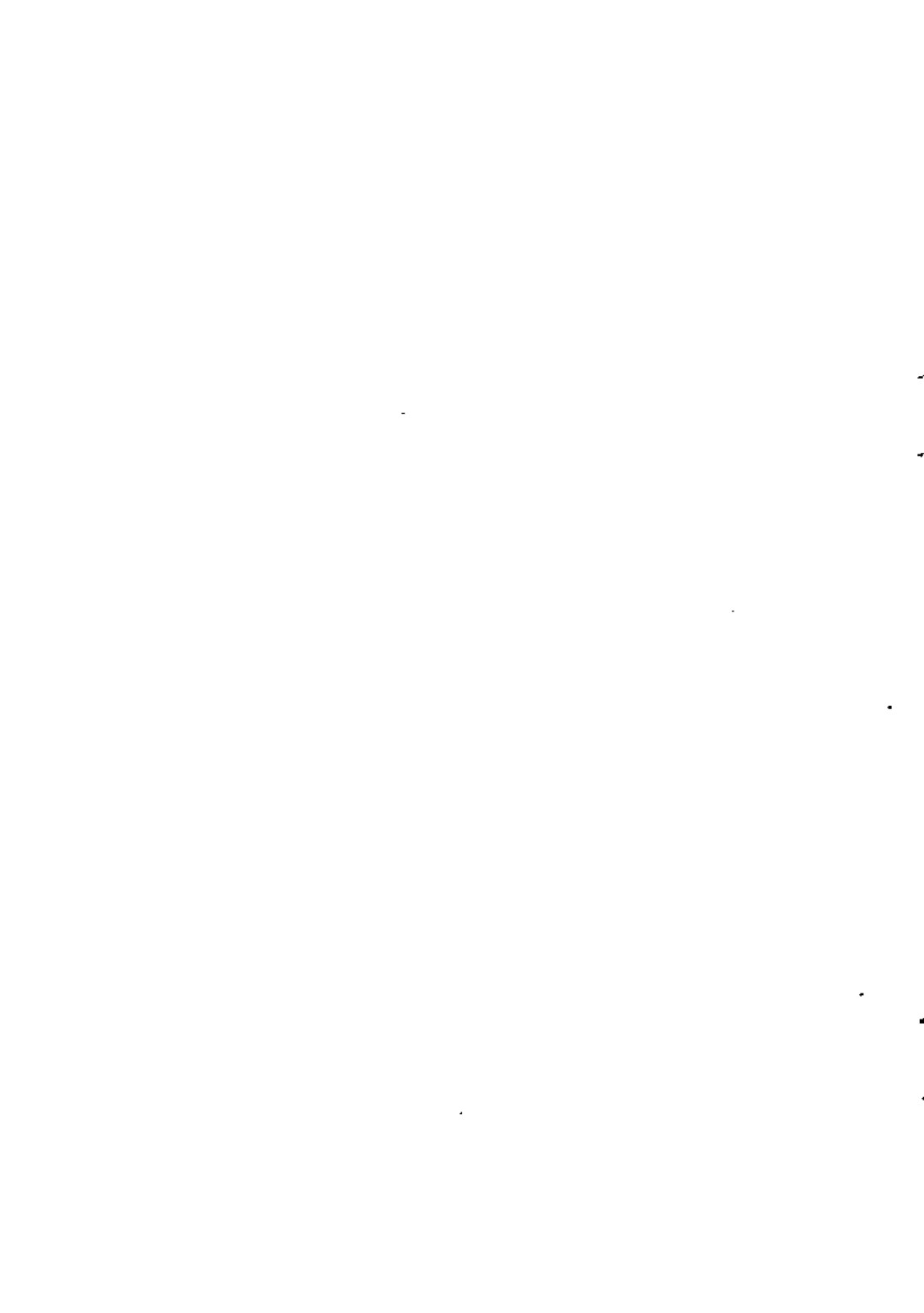
Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

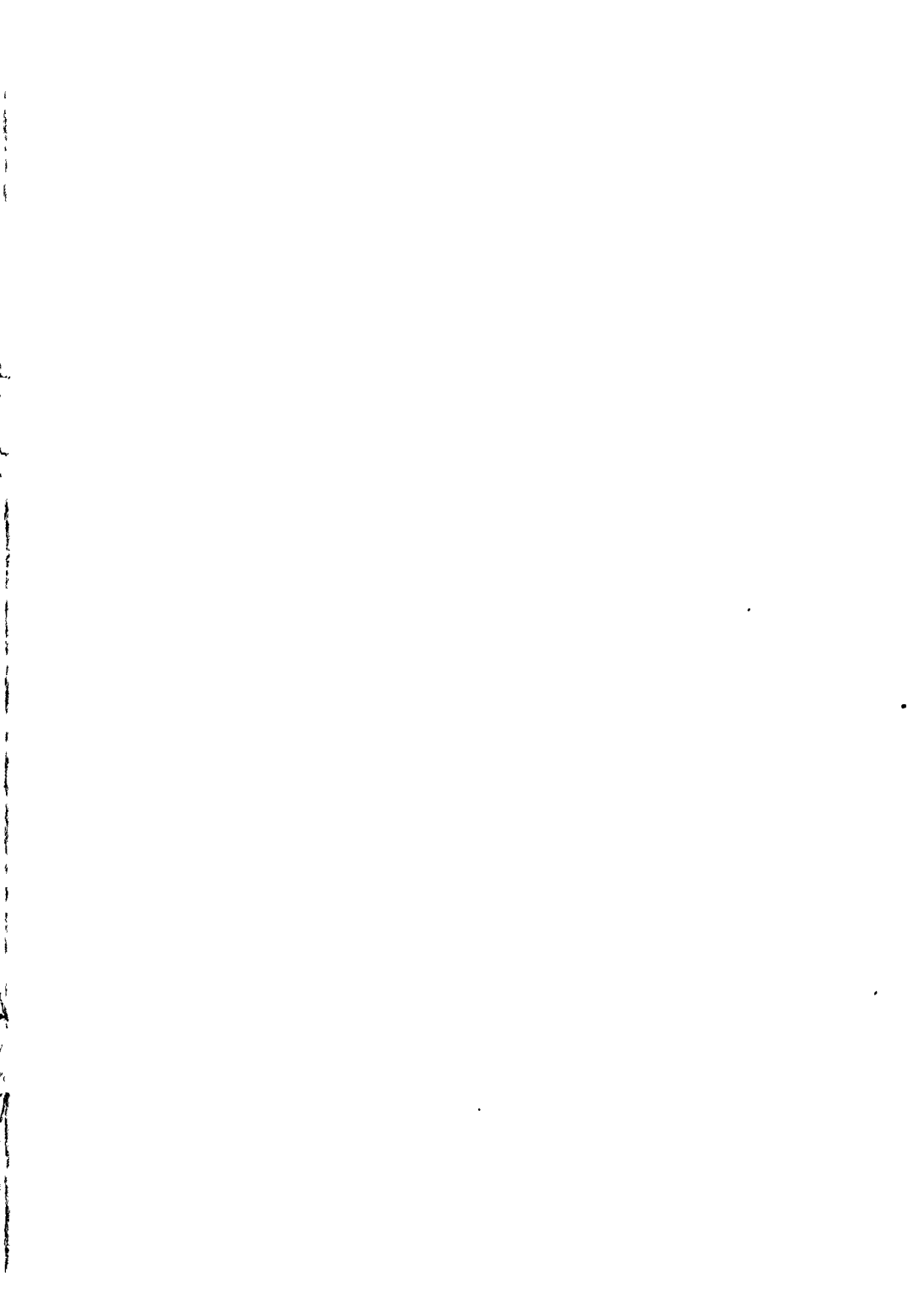
1. М.А. Белов, А.А. Карабутов, И.М. Пеливанов, Н.Б. Подымова. Диагностика пористости графито-эпоксидных композитов лазерным ультразвуковым методом. // Контроль. Диагностика., 2003 г., №2, с.48-54.
2. M.A. Belov, A.A. Karabutov, V. Kozhushko, I.M. Pelivanov, N.B. Podymova. Laser ultrasonic nondestructive testing and evaluation of composite materials. // Laser Physics Workshop 2002.
3. М.А. Белов, А.А. Карабутов, В.А. Макаров, В.Л. Шкуратник, Е.Б. Черепецкая. О возможностях акусто-оптической спектроскопии геоматериалов. Сборник трудов XIII сессии Российского акустического общества. - М.: ГЕОС, 2003, с.55-58.
4. М.А. Белов, А.А. Карабутов, В.А. Макаров, В.Л. Шкуратник, Е.Б. Черепецкая. Использование лазерного излучения для измерения скоростей распространения упругих волн на образцах геоматериалов малых размеров Сборник трудов XIII сессии Российского акустического общества. - М.: ГЕОС, 2003, с. 59-61.
5. М.А. Белов, А.А. Карабутов, В.А. Макаров, Н.Б. Подымова, В.Л. Шкуратник, Е.Б. Черепецкая. Количественная оценка размеров минерального зерна методом лазерной ультразвуковой спектроскопии. //Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых., 2003 г, №5, с. 3-8.
6. М.А. Белов, А.А. Карабутов, В.А. Макаров, В.Л. Шкуратник, Е.Б. Черепецкая. Способ лазерно-акустического контроля твердых материалов и устройство для его осуществления. Патент Российской Федерации RU2232983C2.
7. М.А. Белов, И.М. Пеливанов, Е.Б. Черепецкая. О возможностях оценки пористости геоматериалов по измеренным значениям скоростей упругих волн. //Обзорные прикладной и промышленной математики, 2004 г, том 11, вып. 2, с. 297.
8. М.А. Белов, Е.Б. Черепецкая. Алгоритм расчета коэффициента поглощения оптического излучения в геоматериалах по параметрам упругих волн при термооптическом возбуждении ультразвука. //Обзорные прикладной и промышленной математики, 2004 г, т.11, №4.
9. М.А. Белов, Е.Б. Черепецкая. Об особенностях измерений акустических характеристик горных пород на образцах малых размеров. //Горный информационно-аналитический бюллетень, 2004 г, т.10, №4, с.31-34.
10. М.А. Белов. Определение параметров зернистой структуры и пористости горных пород лазерным оптико-акустическим методом. // Депонирован в Горном информационно-аналитическом бюллетене в №4, 2005 г. (справка о депонировании №428/12-05).

Подписано в печать 17.11.05
Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз

Формат 60x90/16
Заказ 1173

Типография Московского государственного горного университета
Москва, Ленинский проспект, 6





№22 652

РНБ Русский фонд

2006-4

23476