

АКУСТИКА СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ ТВЕРДЫХ СРЕД.
ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 534.08;534.6;534-18

**ВЛИЯНИЕ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПОЛЕВЫХ ШПАТОВ
НА СПЕКТРАЛЬНУЮ МОЩНОСТЬ ОБРАТНОРАССЕЯННЫХ
ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРОДОЛЬНЫХ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН**

© 2022 г. Н. Б. Подымова^{а, *}, А. А. Карабутов^{а, б}

^а МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет,
Ленинские горы 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

^б Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Россия

*e-mail: npodymova@mail.ru

Поступила в редакцию 19.05.2022 г.

После доработки 22.06.2022 г.

Принята к публикации 05.07.2022 г.

Исучено влияние микротрещин в лабораторных образцах полевых шпатов на спектральную мощность широкополосных импульсов продольных ультразвуковых волн, рассеянных назад в исследуемом образце (так называемую мощность структурного шума). Для этой цели использован оптико-акустический преобразователь, в котором совмещено лазерное возбуждение зондирующих широкополосных ультразвуковых импульсов в пленке из черного полиэтилена и пьезоэлектрическая регистрация как зондирующих, так и рассеянных в образце импульсов. Исследованы образцы ортоклаза и плагиоклаза с участками скоплений микротрещин, неравномерно распределенных по объему образцов. Такие участки выявлялись по данным оптической микроскопии поверхности образцов и по результатам измерения коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн в спектральном диапазоне 1–15 МГц. В участках с повышенным затуханием ультразвука также наблюдалось возрастание мощности структурного шума. Обнаруженная корреляция между концентрацией микротрещин и мощностью структурного шума может служить основой для разработки методики неразрушающей оптико-акустической диагностики возникновения и эволюции локальных микротрещин в образцах горных пород и минералов под действием различных нагрузок.

Ключевые слова: лазерный оптико-акустический метод, локальная трещиноватость, полевые шпаты, обратнорассеянные ультразвуковые сигналы, мощность структурного шума

DOI: 10.31857/S0320791922060090

ВВЕДЕНИЕ

Исследование разномасштабных структурных неоднородностей горных пород и минералов является актуальным во многих прикладных задачах (сейсморазведка и поиск полезных ископаемых, мониторинг технического состояния инженерных сооружений, разработка моделей возникновения очагов разрушения в конструкциях под действием внешних нагрузок и т.п.). Известно, что прочностные свойства геоматериалов зависят не столько от свойств составляющих минералов, сколько от характера взаимодействия между ними, наличия пор, трещин, заполняющей их жидкости и т.п. [1, 2]. Исходное распределение микротрещин по объему образцов или конструкций из геоматериалов определяет как их деформационную стабильность, так и характер разрушения (см., например, [3–6]). Исходная неоднородная трещиноватость

геоматериалов может привести к неравномерному распределению внешней нагрузки и появлению участков, вероятность разрушения которых выше средней вероятности для всего образца при данной нагрузке. Поэтому разработка методов on-line диагностики возникновения и эволюции микротрещин в таких материалах под действием различных механических нагрузок необходима, прежде всего, для обеспечения безопасной работы объектов промышленной инфраструктуры (атомных станций, фундаментов плотин, подземных выработок).

В настоящее время для исследования трещиноватости образцов геоматериалов используется множество разрушающих и неразрушающих методов. Наиболее распространенными являются петрографические исследования тонких шлифов, оптическая и электронная микроскопия, рентге-

новская компьютерная томография, измерение скорости и затухания ультразвуковых волн различных типов, а также методики акустической эмиссии, позволяющие контролировать процесс возникновения и эволюции трещин в образцах в процессе нагружения.

Петрографические и микроскопические методики позволяют получать детальную картину распределения микротрещин, однако в большинстве своем требуют разрушения образцов, являются достаточно дорогими и трудоемкими. Метод рентгеновской компьютерной томографии является неразрушающим и дает полную картину распределения структурных неоднородностей в образце. Однако он также является весьма трудоемким в части обработки изображений и требует ограничения на размер образцов для получения максимального пространственного разрешения; кроме того, этот метод неприменим для натуральных испытаний и для *on-line* наблюдения возникновения трещин в образцах в процессе их нагружения.

Задача мониторинга зарождения и эволюции трещин в геоматериалах в процессе их нагружения успешно решается с использованием различных методик по регистрации сигналов акустической эмиссии в нагружаемых образцах геоматериалов [7–9]. Эти методики позволяют определять места зарождения микротрещин, а также наблюдать в реальном времени процессы распространения трещин в образцах при различных режимах механического нагружения. Многочисленные экспериментальные данные подтверждают, что метод акустической эмиссии может использоваться для исследования механизмов разрушения квазихрупких неоднородных геоматериалов при различных видах статического нагружения (см., например, [10–12]). Применение методик акустической эмиссии требует предварительной информации о распределении микротрещин в исходных образцах, получаемой обычно с использованием рентгеновской компьютерной томографии этих образцов [13].

Для более полного понимания механизма влияния морфологии и пространственного распределения микротрещин на упругие свойства геоматериалов широко используются измерения скоростей распространения акустических волн различных типов в таких материалах [14]. Результаты многочисленных работ последнего десятилетия демонстрируют высокую чувствительность методик измерения скоростей акустических волн к анизотропии упругих свойств, к возникновению очагов микротрещин и их ориентации при приложении различных нагрузок, а также к степени насыщения горных пород различными жидкостями (см., например, [15–19] и имеющиеся там ссылки). Хорошо известно, что для достижения максимальной чувствительности скорости и

затухания ультразвуковых волн к структурным неоднородностям материала, длина волны должна быть порядка характерных размеров таких неоднородностей (например, зерен или микротрещин в геоматериалах). Поскольку в лабораторных образцах геоматериалов размеры трещин варьируются, как правило, от десятков микрометров до нескольких миллиметров, для их исследований целесообразно использовать зондирующие ультразвуковые импульсы в спектральном диапазоне от сотен килогерц до десятков мегагерц. Более того, амплитуда зондирующих импульсов должна быть достаточно высока для обеспечения надежной диагностики неоднородных геоматериалов, которые сильно поглощают и рассеивают ультразвуковые волны.

Совместное требование на широкий частотный диапазон и высокую амплитуду возбуждаемых ультразвуковых импульсов выполняется при использовании лазерного термооптического механизма возбуждения ультразвука — оптико-акустического эффекта [20]. При поглощении наносекундных импульсов традиционных лазеров с модуляцией добротности в специально подобранном материале — «лазерном источнике ультразвука» — амплитуда возбуждаемых акустических импульсов может достигать десятков атмосфер при длительности импульса от единиц до сотен наносекунд (в зависимости от энергии и длительности лазерного импульса, а также коэффициента поглощения света и теплофизических характеристик данного материала). Такие уникальные характеристики лазерного ультразвука позволяют использовать его для высокоточных измерений механических и акустических свойств различных твердых тел, а также для количественной оценки разномасштабных структурных неоднородностей конструкционных материалов по анализу ультразвукового отклика (см., например, [21–26]).

В настоящей работе предложен и экспериментально реализован лазерный оптико-акустический метод оценки степени локальной трещиноватости лабораторных образцов геоматериалов на примере образцов двух типов полевых шпатов (ортоклаз и плагиоклаз). Различные полевые шпаты являются наиболее распространенными порообразующими минералами, как в континентальной, так и в океанической земной коре [27], а также являются одним из основных компонентов гранитов и других природных строительных материалов. Для полевых шпатов характерна природная локальная микротрещиноватость, при этом поверхностные трещины размерами в десятки и сотни микрометров можно достаточно легко визуализировать с помощью оптического микроскопа. Предлагаемый лазерный оптико-акустический метод основан на анализе спектральной мощности ультразвуковых сигналов, рассеянных

назад на локальных микротрещинах, распределенных по всей толщине образца в зоне прозвучивания. Ранее [26] подобные ультразвуковые сигналы, рассеянные назад на структурных неоднородностях композиционных материалов, были названы “структурным шумом”. Лазерный оптико-акустический метод измерения временных или спектральных характеристик структурного шума позволяет преодолеть существенное ограничение при измерениях скоростей распространения ультразвуковых волн, а именно, требование плоскопараллельности входной и выходной граней исследуемого образца. Целью настоящей работы является выявление корреляции между спектральной мощностью структурного шума и локальной концентрацией микротрещин в исследуемых образцах минералов. Такая корреляция может служить основой для ультразвуковых систем on-line мониторинга возникновения и развития микротрещин в структуре минералов и горных пород под действием различных внешних нагрузок.

ИССЛЕДОВАННЫЕ ОБРАЗЦЫ МИНЕРАЛОВ

В качестве исследуемых минералов были взяты три образца ортоклаза (калийный полевой шпат $K[AlSi_3O_8]$) и один образец плагиоклаза (член изоморфного ряда $NaAlSi_3O_8$ (30–50%) — $CaAl_2Si_2O_8$ (50–70%)) [27]. Образцы отполированы с двух сторон так, чтобы полированные грани были плоскопараллельны. Фотографии исследуемых образцов представлены на рис. 1, здесь же указаны их толщины H . Точность измерения всех толщин составляла 10 мкм. Полевые шпаты характеризуются слоистым строением из тонких пластинчатых кристаллов и наличием локализованных очагов скоплений трещин с характерными размерами от десятков до сотен микрометров. В исследуемых образцах миллиметровой толщины места скоплений микротрещин в объеме образцов могут быть качественно определены при их просвечивании видимым светом. В каждом образце с помощью оптического микроскопа были предварительно определены места выхода микротрещин на поверхность (рис. 1). Таким образом, были визуально определены возможные участки локализации микротрещин в объеме образцов. Номера этих участков указаны цифрами на каждом образце и оптических изображениях на рис. 1. Затем были проведены исследования внутренней структуры этих участков с помощью лазерного оптико-акустического метода, описанного ниже.

Следует отметить, что микротрещины во всех образцах были закрытыми, что позволило отполировать образцы без нарушения их целостности. Такой характер микротрещин обеспечивает нулевую проницаемость образцов для воды, использу-

емой в ультразвуковых экспериментах в качестве иммерсионной жидкости (см. ниже).

ЛАЗЕРНЫЙ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Для возможности обнаружения локальных очагов скопления микротрещин и оценки их концентрации в образцах минералов, в которых невозможно напрямую возбудить ультразвуковые сигналы лазерным излучением из-за его слабого поглощения, использовался лазерно-ультразвуковой преобразователь, подробно описанный в [28] (рис. 2). В преобразователе совмещены лазерное возбуждение широкополосных ультразвуковых импульсов в специальном оптико-акустическом (ОА) источнике (пленка из черного полиэтилена толщиной 50 мкм) и пьезоэлектрическая регистрация зондирующих ультразвуковых импульсов и импульсов, рассеянных в образце. Этот преобразователь позволяет проводить исследования при одностороннем доступе к образцу, имеющему только одну плоскую поверхность, и не требует регистрации эхо-сигналов. При поглощении лазерного излучения в приповерхностном слое полиэтилена толщиной порядка обратной величины коэффициента поглощения ($\approx 800 \text{ см}^{-1}$) на рабочей длине волны (1064 нм), происходит неоднородный нагрев этого слоя и его последующее тепловое расширение. Это приводит к возникновению двух одинаковых импульсов продольных ультразвуковых волн, распространяющихся в противоположных направлениях. Амплитуда и временной профиль этих импульсов определяются коэффициентом поглощения света в черном полиэтилене, его теплофизическими свойствами, временным профилем интенсивности поглощенного лазерного импульса и соотношением акустических импедансов оргстекла (призмы-звукопровода) и полиэтилена [20]. Один импульс, обозначенный цифрой 0 на рис. 2, распространяется назад в призму к пьезоприемнику и не используется в измерениях; другой импульс, обозначенный цифрой 1, распространяется вперед в иммерсионный слой дистиллированной воды толщиной 1 мм между полиэтиленом и исследуемым образцом и далее распространяется в образце (зондирующий ультразвуковой импульс). При этом он частично отражается на границе раздела вода—образец и распространяется назад через воду, полиэтилен и призму, и также регистрируется пьезоприемником (импульс 2 на рис. 2). Зондирующий импульс 1, распространяющийся в образце, частично рассеивается в обратном направлении на неоднородностях структуры, например, трещинах и инородных включениях. Совокупность таких рассеянных ультразвуковых импуль-

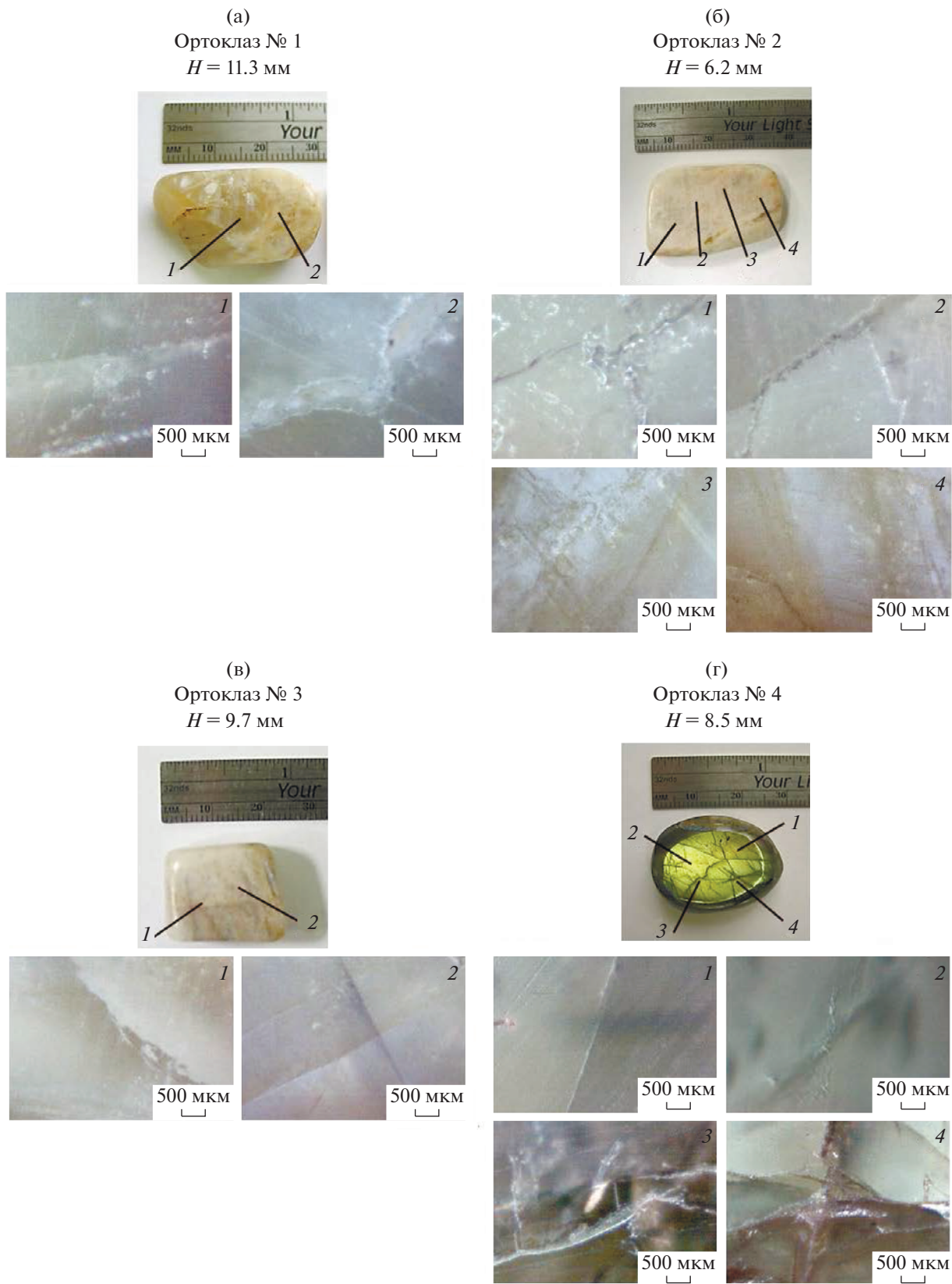


Рис. 1. Фотографии образцов полевых шпатов и оптические изображения исследованных участков в каждом образце, цифрами 1–4 обозначены исследуемые участки образцов.

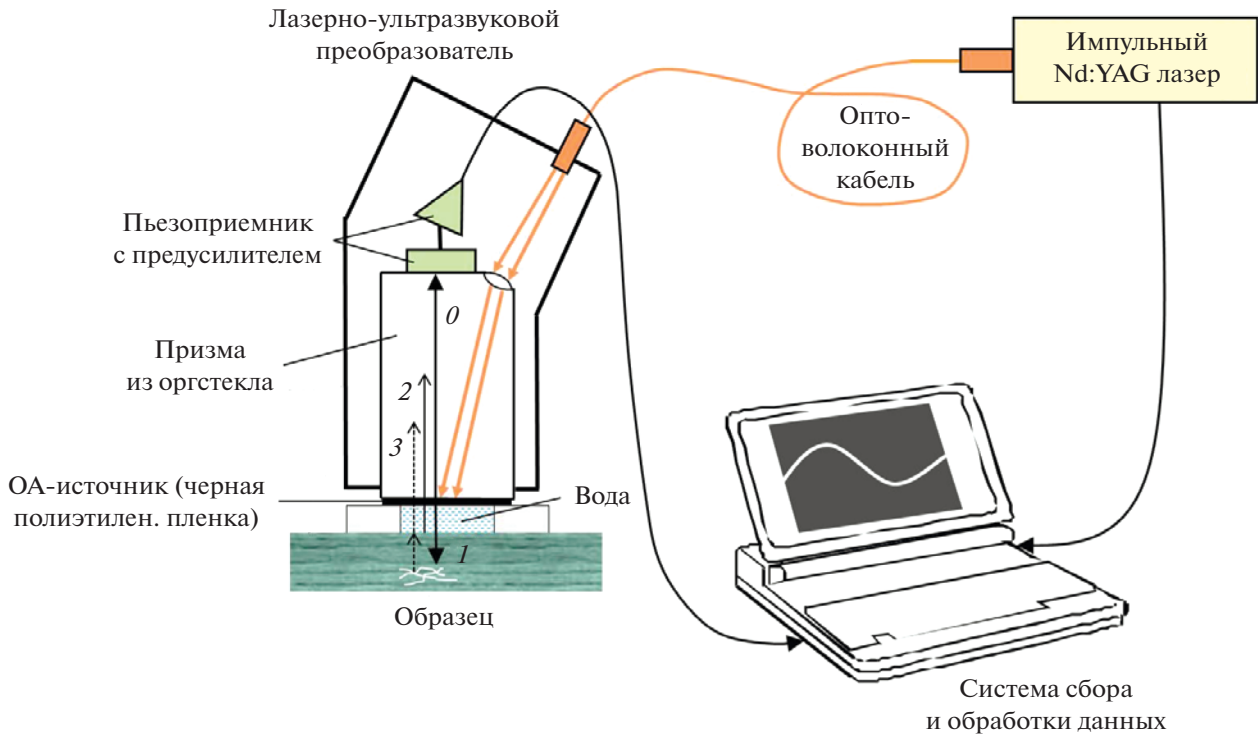


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки с лазерно-ультразвуковым преобразователем для исследования локальной трещиноватости образцов минералов.

сов обозначена цифрой 3 на рис. 2 и представляет собой так называемый структурный шум. Характерный радиус ультразвукового пучка на лицевой поверхности образца практически совпадает с радиусом поглощенного лазерного пучка и составляет 2–3 мм. Практически такой же является область тестирования в поперечном направлении (по плоскости образца), что позволяет выявлять участки с повышенной трещиноватостью в сильно неоднородных по структуре геоматериалах.

Для исследования локальной концентрации микротрещин в прозвучиваемом участке образца регистрируются временной трек совокупности импульсов 2 и 3, а также аналогичный трек, зарегистрированный от однородной пластины плавленного кварца, которая ставится на место исследуемого образца. Временная форма сигнала от кварцевой пластины повторяет зондирующий импульс 1 с учетом изменения амплитуды за счет отражения на границе раздела вода–кварц (рис. 2). На рис. 3а показаны примеры временных профилей нормированных ультразвуковых сигналов для кварцевой пластины и для образцов ортоклаза № 1 (участок 2) и плагиоклаза № 4 (участок 4). В этих участках образцов визуально наблюдалось существенное скопление микротрещин (см. рис. 1а, 1г). При распространении в образце зондирующий импульс частично рассеивается на микротрещинах, расположенных на разных глубинах в про-

звученном участке образца. Обратнорассеянные сигналы регистрируются как нерегулярные пики на “хвосте” опорного импульса (врезка на рис. 3а) и образуют структурный шум. Для оценки степени локальной трещиноватости в прозвученном участке образца используется спектральный анализ сигнала во временном окне, соответствующем времени пробега зондирующего импульса до тыльной поверхности образца и обратно к границе раздела образец–вода. Такие спектры сигналов с рис. 3а показаны на рис. 3б.

Амплитудный спектр $S(f)$ ультразвукового сигнала от образца представляет собой совокупность спектра зондирующего импульса и нерегулярной (“осциллирующей”) части, определяемой структурным шумом. Спектр зондирующего импульса $S_0(f)$ соответствует спектру сигнала от кварцевой пластины, поскольку мы считаем, что в кварце структурный шум отсутствует. Информация о локальной концентрации микротрещин в прозвученном участке образца содержится именно в нерегулярной части спектра, определяемой рассеянными назад сигналами. Мы полагаем, что увеличение амплитуды этих сигналов и, соответственно, амплитуды осцилляций в спектре $S(f)$, определяется увеличением концентрации микротрещин в исследуемом участке образца. Величина

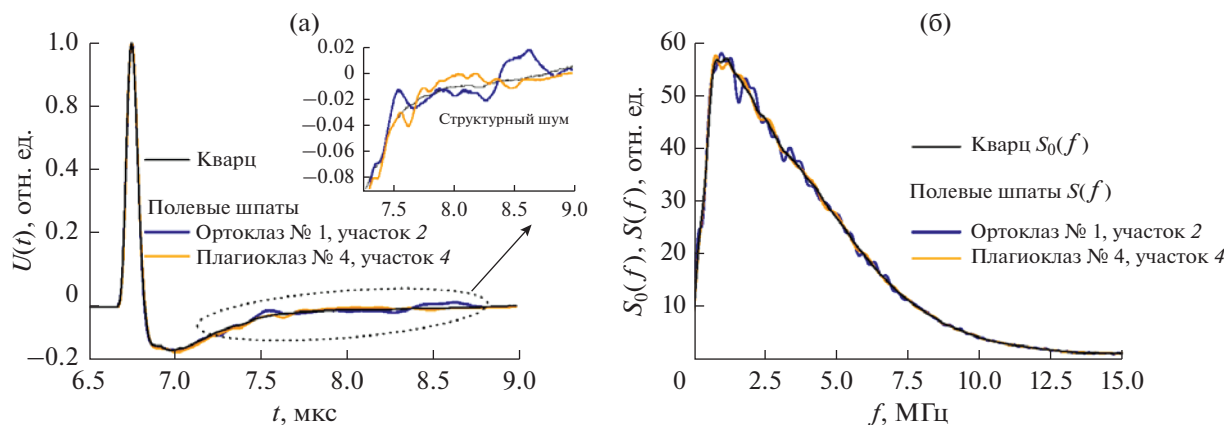


Рис. 3. Примеры ультразвуковых сигналов для кварцевой пластины и для образцов ортоклаза № 1 (участок 2) и плагиоклаза № 4 (участок 4): (а) – временные профили, (б) – соответствующие спектры.

$$W = \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} [S(f) - S_0(f)]^2 df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_0^2(f) df} \quad (1)$$

является интегральной нормированной мощностью нерегулярной части спектра, названной “мощностью структурного шума”, $f_{\min} = 0.2$ МГц и $f_{\max} = 15$ МГц – нижняя и верхняя границы рабочего частотного диапазона лазерно-ультразвукового преобразователя. Величина W содержит вклады от всех сигналов, рассеянных на разном размерных микротрещинах, локализованных в прозвученном участке образца, без разделения вкладов от микротрещин конкретного размера.

Основной проблемой применения данного метода для оценки концентрации микротрещин является возможное проникновение иммерсионной жидкости (воды) в открытые трещины, выходящие на поверхность образца, и частичное их заполнение. Известно, что интенсивность рассеяния ультразвуковых волн на микротрещинах существенно зависит от их заполнения жидкостью, поскольку амплитуда рассеяния прямо пропорциональна контрасту упругих модулей твердой фазы образца и включения (в данном случае частично заполненной трещины) [29]. Поскольку, как указывалось выше, проницаемость исследуемых образцов полевых шпатов была нулевой, вода не попадала в микротрещины и, соответственно, не влияла на интенсивность рассеяния ультразвука.

Для подтверждения того, что именно микротрещины влияют на эффективность обратного рассеяния ультразвуковых сигналов (или мощность структурного шума) в различных участках исследуемых образцов, в этих же участках были

проведены измерения коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн. Для этой цели использовался метод широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником ультразвука – оптическим светофильтром СЗС-22, детально описанным в [24] (коэффициент затухания рассчитывался по формуле (2) из [24]). Поскольку микротрещины являются весьма эффективными рассеивателями ультразвуковых волн и для исследуемых минералов характерно практически полное отсутствие твердых инородных включений и зерен субмиллиметровых размеров с шероховатыми нерегулярными границами, увеличение коэффициента затухания ультразвука в диапазоне частот источника СЗС-22 объяснялось повышенной концентрацией микротрещин в исследуемом участке образца. Затем была проанализирована корреляция между величиной коэффициента затухания ультразвука и мощностью структурного шума в рабочем спектральном диапазоне лазерно-ультразвукового преобразователя, используемого в настоящей работе (0.2–15 МГц).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчета мощности структурного шума во всех образцах минералов в качестве спектра зондирующего импульса $S_0(f)$ был взят результат усреднения спектров четырех импульсов от произвольно выбранных участков кварцевой пластины (рис. 4). Разность между $S_0(f)$ и спектром каждого импульса определяет так называемую мощность “аппаратного” шума W_0 , которая вычислялась по формуле (1), где в качестве $S(f)$ были взяты спектры каждого импульса. Ненулевая величина W_0 определяется электрическими шумами и шумами дискретизации сигнала, а также некоторой нестабильностью временной формы лазерного импуль-

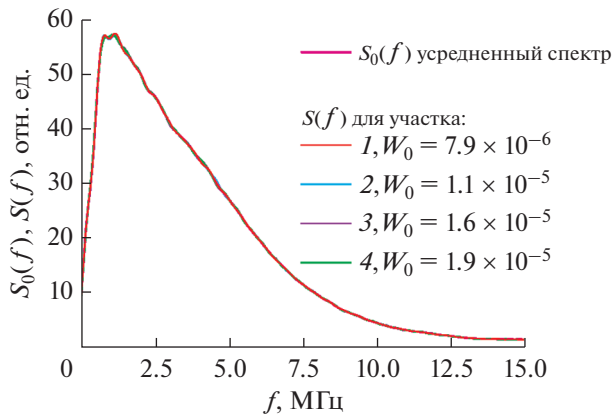


Рис. 4. Спектры $S(f)$ ультразвуковых импульсов от четырех произвольно выбранных участков кварцевой пластины и усредненный спектр $S_0(f)$.

са и соответствующего акустического импульса, возбуждаемого в полиэтилене для каждого участка кварцевой пластины. Спектры импульсов $S(f)$ для четырех участков достаточно близки, соот-

ветствующие рассчитанные значения мощности аппаратного шума W_0 указаны на рис. 4.

На рис. 5 в качестве примеров представлены спектры ультразвуковых импульсов для разных участков образцов полевых шпатов, здесь же показан спектр зондирующего импульса $S_0(f)$. Для ортоклазов № 1 и № 3 (рис. 5а, 5в) представлены спектры импульсов в обоих исследованных участках каждого образца; для ортоклаза № 2 и плагиоклаза № 4 (рис. 5б, 5г) представлены спектры импульсов для участков с минимальной и максимальной мощностью структурного шума W . Эти значения, рассчитанные по формуле (1) для соответствующих участков, также приведены на рис. 5. Результаты показывают, что величина W для всех образцов минералов на один–два порядка превышает мощность аппаратного шума W_0 . Величина последней, усредненная по четырем реализациям для кварцевой пластины ($\langle W_0 \rangle \approx 1.3 \times 10^{-5}$), может рассматриваться как погрешность определения W .

Для анализа корреляции между локальной концентрацией микротрещин в исследуемых образцах и измеренной мощностью структурного

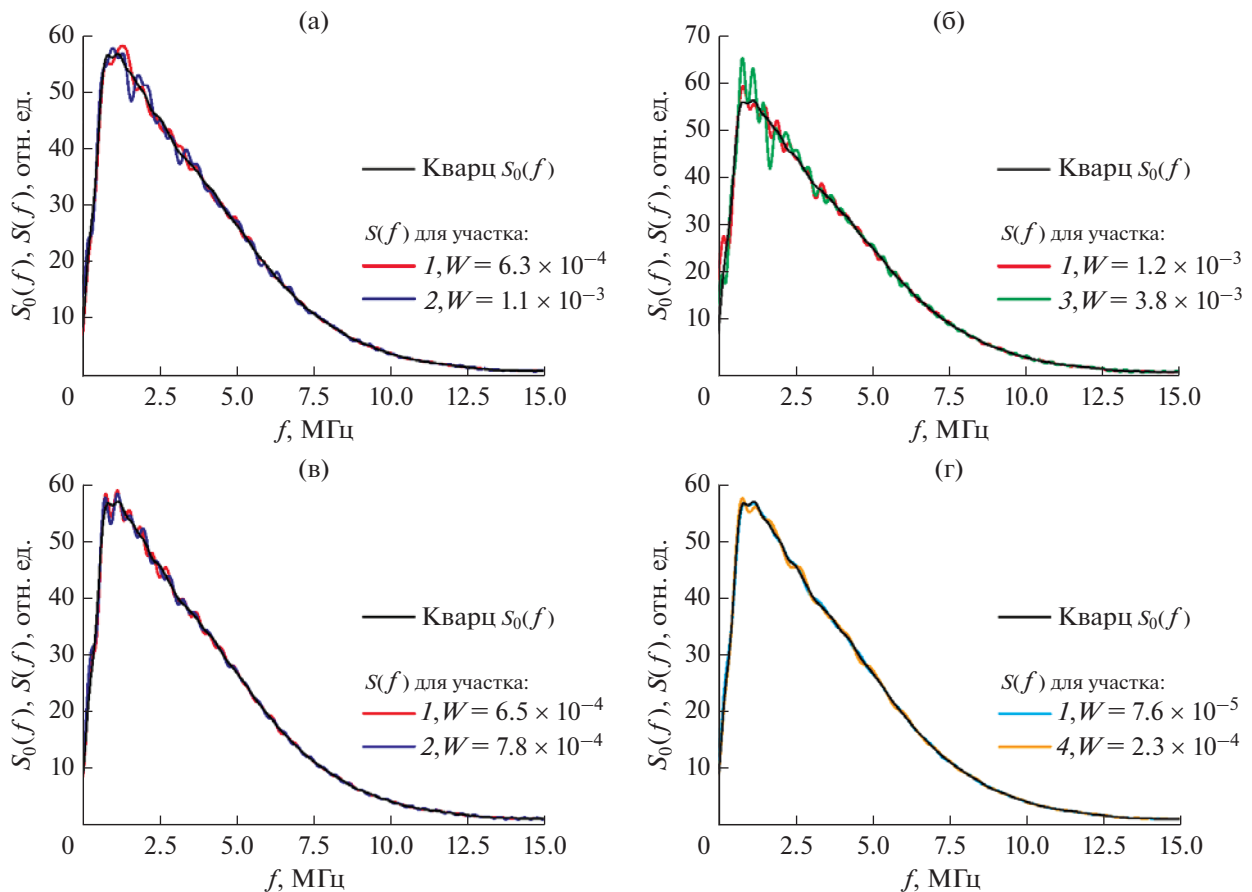


Рис. 5. Примеры спектров ультразвуковых импульсов и соответствующие значения мощности структурного шума W в различных участках образцов полевых шпатов: (а)–(в) – ортоклазы № 1–3, (г) – плагиоклаз № 4.

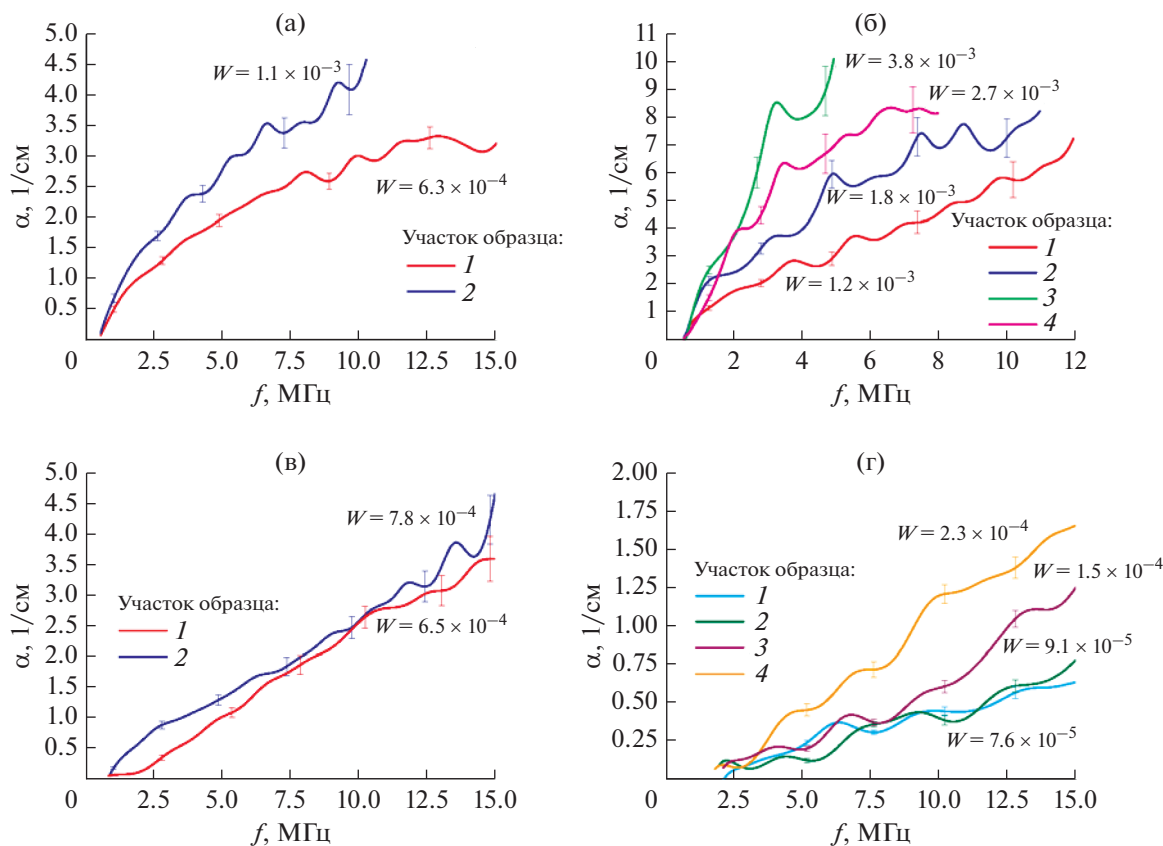


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн и соответствующие значения мощности структурного шума W во всех исследованных участках образцов полевых шпатов: (а)–(в) – ортоклазы № 1–3, (г) – плагиоклаз № 4.

шума мы предположили, что микротрещины и их скопления размерами от сотен микрометров до единиц миллиметров (см. рис. 1) достаточно эффективно рассеивают ультразвук в мегагерцовом рабочем диапазоне используемого лазерно-ультразвукового преобразователя. Для подтверждения этого предположения были измерены частотные зависимости коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн $\alpha(f)$ в каждом из участков, в которых предварительно были визуализированы выходы микротрещин на поверхность образца, а затем измерена мощность структурного шума W . Полученные зависимости $\alpha(f)$ для всех исследованных участков образцов представлены на рис. 6; здесь же указаны значения мощности структурного шума W в каждом участке. Для образца плагиоклаза № 4 наиболее четко видно, что локальное скопление микротрещин, выходящих на поверхность участка 4 (рис. 1г), приводит к существенному возрастанию $\alpha(f)$ в этом участке во всем рабочем частотном диапазоне (рис. 6г). Для остальных образцов наблюдалась аналогичная корреляция между визуализированными локальными скоплениями микротрещин и величиной $\alpha(f)$. Также видно, что чем выше ко-

эффициент затухания ультразвука в исследуемом участке образца, тем больше значение W в этом участке. Таким образом, можно считать, что увеличение мощности структурного шума обусловлено возрастанием локальной концентрации микротрещин в исследуемом участке образца. Следует отметить, что данный лазерно-ультразвуковой метод может применяться не только для оптически прозрачных и полупрозрачных образцов минералов, но и для непрозрачных образцов, в которых невозможно заранее визуализировать локальные скопления микротрещин.

Количественное определение локальной концентрации микротрещин в исследуемых образцах (в процентном соотношении) возможно с использованием рентгеновской компьютерной томографии. Для этого необходимо знать плотность твердой фазы каждого образца, что весьма затруднительно для геоматериалов переменного минерального состава. Кроме того, как указывалось во Введении, метод рентгеновской томографии требует существенного времени для обработки изображений, имеет ограничения на размер образцов для получения максимального пространственного разрешения, и неприменим для натуральных из-

мерений. С другой стороны, разработанный лазерно-ультразвуковой метод позволяет получать информацию о структуре образцов минералов практически в реальном времени за счет высокой частоты повторения лазерных импульсов и высокого отношения сигнал—шум, достаточного для усреднения небольшого числа реализаций сигналов. Этот метод может быть достаточно легко адаптирован для систем диагностики возникновения и развития трещин в структуре минералов в процессе их нагружения, а также для проведения исследований структуры образцов горных пород в полевых условиях. Для получения количественной информации о концентрации микротрещин в исследуемых образцах минералов или геоматериалов по значениям мощности структурного шума необходима предварительная калибровка лазерно-ультразвукового метода по данным рентгеновской компьютерной томографии, т.е. получение зависимости величины W от процентного содержания микротрещин в каждом конкретном минерале или геоматериале.

Предложенный лазерный оптико-акустический метод, по существу, аналогичен методикам количественной оценки локальной сейсмоактивности, основанной на анализе характеристик акустических сигналов (ревербераций), возникающих после сейсмических толчков и затем однократно или многократно рассеянных на структурных неоднородностях горных пород (см., например, [30–32]). Поэтому данный метод может быть полезен для экспериментальной верификации количественных моделей сейсмических источников на основе результатов исследования как исходной трещиноватости образцов горных пород, так и процесса эволюции микроповрежденности под действием динамических нагрузок и возникновения очагов макроразрушений.

В качестве еще одного практического применения предложенного метода можно указать исследования особенностей рассеяния широкополосных акустических сигналов в гранулированных и неоднородных средах с дискретными включениями различных размеров (см., например, [33, 34]). Анализ временных и спектральных характеристик акустических сигналов, обратно рассеянных на зернах и включениях, позволяет количественно оценить размеры областей изменения конфигурации упаковки зерен под действием динамических нагрузок различной природы [33], а также выявить корреляцию во взаимном расположении разноразмерных неоднородностей и получить статистические данные об их распределении по размерам [34].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены экспериментальные исследования влияния локальной микротрещино-

ватости лабораторных образцов полевых шпатов на спектральную мощность обратнорассеянных широкополосных импульсов продольных ультразвуковых волн (так называемую мощность структурного шума). Предложенная методика позволяет проводить исследования при одностороннем доступе к объекту контроля без измерения его толщины и регистрации донных ультразвуковых эхо-сигналов. Исследованы три образца ортоклаза и один образец плагиоклаза с локальными скоплениями микротрещин, которые были выявлены по данным оптической микроскопии поверхности образцов. В участках образцов с визуально наблюдаемыми скоплениями микротрещин обнаружено возрастание коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн в спектральном диапазоне 1–15 МГц по сравнению с неповрежденными участками. Такое возрастание объяснялось повышенной концентрацией микротрещин размерами в десятки и сотни микрометров, являющихся эффективными рассеивателями акустических волн в мегагерцовом диапазоне частот. В участках с повышенным затуханием продольных ультразвуковых волн также наблюдалось возрастание мощности структурного шума. Область тестирования в поперечном направлении (по плоскости образца) составляет 2–3 мм, что дает возможность выявлять участки с повышенной трещиноватостью в сильно неоднородных по структуре геоматериалах. Обнаруженная прямая корреляция между возрастанием уровня мощности структурного шума и увеличением локальной микротрещиноватости может служить основой для разработки методик неразрушающей оптико-акустической диагностики возникновения и эволюции микротрещин в структуре геоматериалов под действием различных внешних нагрузок. Такая диагностика необходима, в частности, для локализации очагов микро- и макроразрушений в горных породах в окрестности потенциально опасных объектов промышленной инфраструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wittke W.* Rock mechanics: Theory and applications with case histories. Berlin: Springer-Verlag, 1990. 1075 p.
2. The rock physics handbook. Tools for seismic analysis in porous media. New York, Melbourne: Cambridge University Press, 2009. 525 p.
3. *Nemat-Nasser S., Obata M.* A microcrack model of dilatancy in brittle materials // *J. Appl. Mech.* 1988. V. 55. № 1. P. 24–35.
4. *Sagong M., Bobet A.* Coalescence of multiple flaws in a rock model material in uniaxial compression // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2002. V. 39. P. 229–241.
5. *Wong L.N.Y., Einstein H.H.* Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2009. V. 46. P. 239–249.

6. *Yang S.-Q., Jing H.-W.* Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression // *Int. J. Fract.* 2010. V. 168. P. 227–250.
7. *Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Tyupkin Yu.S.* The stages of earthquake preparation: laboratory experiment and field study. In: *Balassanian S., Cisternas A., and Melkumyan M.* (eds.) *Earthquake hazard and seismic risk reduction.* Dordrecht: Springer, 2000. P. 211–223.
8. *Лавров А.В., Шкуратник В.Л.* Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. Приложение. С. 6–18.
9. *Grosse C.U., Ohtsu M.* (eds.) *Acoustic emission testing: Basics for research – applications in civil engineering.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 406 p.
10. *Кадомцев А.Г., Дамаскинская Е.Е., Куксенко В.С.* Особенности разрушения гранита при различных условиях деформирования // *ФТТ.* 2011. Т. 53. № 9. С. 1777–1782.
11. *Xu Shi-da, Li Yuan-hui, Liu Jian-po.* Detection of cracking and damage mechanisms in brittle granites by moment tensor analysis of acoustic emission signals // *Acoust. Phys.* 2017. V. 63. № 3. P. 359–367.
12. *Пантелеев И.А.* Анализ тензора сейсмического момента акустической эмиссии: микромеханизмы разрушения гранита при трехточечном изгибе // *Акуст. журн.* 2020. Т. 66. № 6. С. 654–668.
13. *Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Гафурова Д.Р., Фролов Д.И.* Структура деформируемого гетерогенного материала по данным акустической эмиссии и рентгеновской микрофотографии // *ФТТ.* 2018. Т. 60. № 7. С. 1353–1357.
14. *Aki K., Richards P.G.* *Quantitative seismology* (2nd edition). CA: Univ. Sci. Books, 2009. 742 p.
15. *Schubnel A., Nishizawa O., Masuda K., Lei X., Xue Z., Gueguen Y.* Velocity measurements and crack density determination during wet triaxial experiments on Oshima and Toki granites // *Pure Appl. Geophys.* 2003. V. 160. № 5. P. 869–887.
16. *Никитин А.Н., Иванкина Т.И., Игнатович В.К.* Особенности распространения продольных и поперечных упругих волн в текстурированных горных породах // *Физика Земли.* 2009. № 5. С. 57–69.
17. *El Azhari H., El Hassani I.* Effect of the number and orientation of fractures on the P-wave velocity diminution: application on the building stones of the Rabat area (Morocco) // *Geomaterials.* 2013. № 3. P. 71–81.
18. *Жуков В.С., Кузьмин Ю.О.* Экспериментальные исследования влияния трещиноватости горных пород и модельных материалов на скорость распространения продольной волны // *Физика Земли.* 2020. № 4. С. 39–50.
19. *Тришина О.М., Горбацевич Ф.Ф., Ковалевский М.В.* Акустические особенности упруго-анизотропных свойств образцов горных пород по разрезу Кольской сверхглубокой скважины СГ-3 // *Акуст. журн.* 2021. Т. 67. № 2. С. 154–173.
20. *Гусев В.Э., Карабутов А.А.* *Лазерная оптоакустика.* М.: Наука, 1991. 304 с.
21. *Карабутов А.А., Подымова Н.Б.* Неразрушающий контроль усталостных изменений структуры композитов лазерным ультразвуковым методом // *Механика композитных материалов.* 1995. Т. 31. № 3. С. 405–410.
22. *Девиченский А.Ю., Ломоносов А.М., Жаринов С.Е., Михалевич В.Г., Лямшев М.Л., Иванова Т.О., Меркулова Н.С.* Диагностика остаточных напряжений в металлах с помощью широкополосных поверхностных акустических импульсов // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 1. С. 39–46.
23. *Карабутов А.А., Подымова Н.Б., Черепецкая Е.Б.* Измерение зависимости локального модуля Юнга от пористости изотропных композитных материалов импульсным акустическим методом с использованием лазерного источника ультразвука // *ПМТФ.* 2013. Т. 54. № 3. С. 181–190.
24. *Карабутов А.А., Подымова Н.Б.* Влияние пористости на дисперсию фазовой скорости продольных акустических волн в изотропных металломатричных композитах // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 3. С. 265–274.
25. *Воробьев Р.И., Сергеичев И.В., Карабутов А.А., Миронова Е.А., Саватеева Е.В., Ахатов И.Ш.* Применение оптоакустического метода для оценки влияния пустот на трещиностойкость конструкционных углепластиков // *Акуст. журн.* 2020. Т. 66. № 2. С. 148–153.
26. *Подымова Н.Б., Карабутов А.А.* Влияние пористости на статистическое распределение амплитуд обратнорассеянных ультразвуковых импульсов в металломатричных композитах, изготовленных методом реакционного литья // *Акуст. журн.* 2021. Т. 67. № 1. С. 55–64.
27. *Brown J.M., Angel R.J., Ross N.L.* Elasticity of plagioclase feldspars // *J. Geophys. Res. Solid Earth* 2016. V. 121. P. 663–675.
28. *Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А.* Лазерный оптико-акустический метод количественной оценки пористости углепластиков на основе измерения их акустического импеданса // *Акуст. журн.* 2020. Т. 66. № 1. С. 86–94.
29. *Лебедев А.В., Островский Л.А., Сутин А.М.* Нелинейная акустическая спектроскопия локальных дефектов в геоматериалах // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. Приложение. С. 103–117.
30. *Aki K., Chouet B.* Origin of coda waves; source, attenuation and scattering effects // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. № 5. P. 3322–3342.
31. *Sato H.* Energy propagation including scattering effects: single isotropic scattering approximation // *J. Phys. Earth.* 1977. V. 25. P. 27–41.
32. *Jin A., Aki K.* High-resolution maps of Coda Q in Japan and their interpretation by the brittle-ductile interaction hypothesis // *Earth Planets Space.* 2005. V. 57. P. 403–409.
33. *Jia X., Laurent J., Khidas Y., Langlois V.* Sound scattering in dense granular media // *Chin. Sci. Bull.* 2009. V. 54. P. 4327–4336.
34. *Гурбатов С.Н., Грязнова И.Ю., Иващенко Е.Н.* Исследование обратного рассеяния акустических волн дискретными неоднородностями разных размеров // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 2. С. 203–207.