

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЛОКАЛЬНОЙ МИКРОТРЕЩИНОВАТОСТИ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ МИНЕРАЛОВ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ЛАЗЕРНЫМ ИСТОЧНИКОМ УЛЬТРАЗВУКА И ЕГО ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2023 г. Н.Б. Подымова^{1,*}, А.Б. Ермолинский^{1,**}, М.С. Чернов^{1,***}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Россия 119991 Москва, Ленинские горы, 1

E-mail: *npodymova@mail.ru; **andrermolinskiy@mail.ru; ***chernov@geol.msu.ru

Поступила в редакцию 27.06.2023; после доработки 02.08.2023

Принята к публикации 03.08.2023

Предложена акустическая методика неразрушающего контроля степени локальной концентрации микротрещин (микротрещиноватости) в лабораторных образцах минералов на основе лазерной генерации ультразвука. Измеряется спектральная мощность широкополосных сигналов продольных ультразвуковых волн, генерируемых при поглощении импульсного лазерного излучения в специальном материале — лазерном источнике ультразвука и рассеянных на микротрещинах в образцах (так называемая мощность структурного шума). Для полевых шпатов двух типов с неравномерным объемным распределением микротрещин получена прямая зависимость между увеличением микротрещиноватости и возрастанием мощности структурного шума в прозвученных участках образцов. Впервые независимым методом рентгеновской компьютерной томографии образцов сложной формы получено подтверждение достоверности результатов акустических измерений. Установленная связь между локальной микротрещиноватостью и мощностью структурного шума может использоваться в системах мониторинга процесса трещинообразования в горных породах и минералах при воздействии различных нагрузок.

Ключевые слова: лазерная генерация ультразвука, полевые шпаты, микротрещины, рассеяние акустических волн, мощность структурного шума, рентгеновская компьютерная томография.

NONDESTRUCTIVE TESTING OF LOCAL MICROCRACKING IN LABORATORY MINERAL SAMPLES USING AN ACOUSTIC TECHNIQUE WITH A LASER SOURCE OF ULTRASOUND AND ITS VERIFICATION WITH X-RAY COMPUTER TOMOGRAPHY

N.B. Podymova^{1,*}, A.B. Ermolinskiy^{1,**}, M.S. Chernov^{1,***}

¹Moscow State University, Russia, 119991 Moscow, Leninskie Gory, 1

E-mail: *npodymova@mail.ru; **andrermolinskiy@mail.ru; ***chernov@geol.msu.ru

An acoustic technique of nondestructive testing of a local microcracking degree in laboratory mineral samples is proposed based on laser generation of ultrasound. A spectral power of broadband signals of longitudinal ultrasonic waves is measured, which are generated by absorption of pulsed laser radiation in a special material served as a laser source of ultrasound and further scattered on microcracks in samples (the so called structural noise power). The direct relationship between an increase in microcracking and a growth in the structural noise power in scanning regions of the samples has been obtained for feldspars of two types. For the first time, an independent method of X-ray computer tomography of the complex-shaped samples confirmed the reliability of the results of acoustic measurements. The established relationship between the local microcracking and structural noise power can be used in the monitoring systems for observing the crack formation in rocks and minerals under different external loadings.

Keywords: laser generation of ultrasound, feldspars, microcracks, scattering of acoustic waves, structural noise power, X-ray computer tomography.

DOI: 10.31857/S0130308223100020, EDN: WZNILK

ВВЕДЕНИЕ

Разработка методик оперативного контроля трещинообразования в массивах горных пород является актуальной для оценки технического состояния сооружений критической инфраструктуры с целью решения задачи прогнозирования катастрофических разрушений, а также для верификации феноменологических теорий разрушения горных пород при воздействии различных внешних нагрузок. Трещиноватость горных пород и минералов, неравномерно распределенная по объему, сильно влияет на их прочностные характеристики и определяет деформационную стабиль-

ность и характер разрушения таких материалов при воздействии внешних нагрузок [1—5]. Поэтому задача обнаружения мест локализации микротрещин в геоматериалах на потенциально опасных объектах инженерной инфраструктуры (шахтах, горных выработках, туннелях) является весьма актуальной для прогнозирования безопасной работы таких объектов. Также необходимой является разработка методик on-line контроля эволюции и процесса распространения микротрещин при воздействии различных нагрузок (механических, тепловых, и т.д.).

Контроль трещинообразования в процессе нагружения геоматериалов успешно осуществляется с использованием методов регистрации сигналов акустической эмиссии в исследуемых образцах (см., например, [6—9]). Эти методы позволяют обнаруживать очаги зарождения и локализации микротрещин и наблюдать динамику их распространения в образцах в процессе механического нагружения. Для получения динамической картины эволюции трещиноватости по сигналам акустической эмиссии необходима предварительная информация о распределении микротрещин в исходных образцах, получаемая обычно по данным рентгеновской компьютерной томографии.

В настоящее время для неразрушающего контроля степени трещиноватости геоматериалов и горных пород широко используют измерения скоростей ультразвуковых волн различных типов, а также методики контроля изменения спектрального состава ультразвуковых импульсов при прохождении через трещиноватый геоматериал [3, 5, 10—15]. Основным недостатком методик измерения скоростей и затухания акустических волн является требование плоскопараллельности образцов для прецизионного определения их толщины (для продольных и сдвиговых волн) или данные о точном расстоянии, пройденном волной в образце (для поверхностных волн). Однако такие требования не всегда могут быть выполнены при исследовании образцов геоматериалов сложной формы, в частности, в полевых условиях. Для преодоления этого недостатка разработаны методики анализа временных и спектральных характеристик ультразвуковых импульсов, рассеянных на структурных неоднородностях исследуемых образцов и зарегистрированных при одностороннем доступе к образцу (так называемый «структурный шум») [16—21]. Известно, что эффективность рассеяния ультразвуковых волн на различных структурных неоднородностях, например, зернах или микротрещинах в геоматериалах, существенно зависит от соотношения размеров этих неоднородностей и длины зондирующей ультразвуковой волны [22]. Поскольку размеры трещин в образцах геоматериалов, исследуемых в лабораторных условиях, как правило, меняются в диапазоне от десятков микрометров до единиц миллиметров, для их эффективного ультразвукового контроля необходимо применять зондирующие импульсы с частотным спектром от сотен килогерц до десятков мегагерц [23]. Кроме того, эти импульсы должны иметь амплитуду достаточную для надежной оценки структуры неоднородных геоматериалов, которые могут эффективно поглощать и рассеивать ультразвук в данном частотном диапазоне.

Генерация мощных ультразвуковых импульсов в широком частотном диапазоне для неразрушающей оценки структуры геоматериалов может успешно осуществляться с использованием лазерного оптико-акустического эффекта [24]. При поглощении лазерных импульсов в специальном материале (так называемом лазерном или оптико-акустическом источнике ультразвука) происходит нестационарное тепловое расширение приповерхностной области материала источника, приводящее к возбуждению акустических импульсов с амплитудой до десятков и сотен атмосфер при их наносекундной длительности. Эти параметры определяются характеристиками поглощенного лазерного импульса, а также коэффициентом поглощения света и теплофизическими свойствами материала источника ультразвука. Высокая амплитуда и малая длительность лазерно-возбуждаемых акустических импульсов дают возможность применять их для количественной оценки разномасштабных структурных неоднородностей в твердых телах по анализу характеристик поглощенных или рассеянных акустических волн (см., например, [25—29]).

Целью настоящей работы является разработка методики неразрушающего контроля локальной концентрации микротрещин в лабораторных образцах минералов с использованием лазерной генерации ультразвука. Измеряется спектральная мощность широкополосных акустических импульсов, обратно рассеянных микротрещинами в области прозвучивания образца (мощность структурного шума), и анализируется связь между величиной этой мощности и локальной микротрещиноватостью. В отличие от предыдущей работы [30] по этой же тематике, в настоящей работе впервые объективная верификация предлагаемой ультразвуковой методики осуществляется независимым методом рентгеновской компьютерной томографии образцов сложной геометрической формы с использованием специальной техники высококонтрастной обработки рентгеновских изображений зон с максимальной концентрацией микротрещин в образцах.

ИССЛЕДОВАННЫЕ ОБРАЗЦЫ МИНЕРАЛОВ

В качестве исследуемых минералов были взяты два 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 %)) [31]. Полевые шпаты являются наиболее распространенными породообразующими минералами, а также — одним из основных компонентов различных типов гранитов и других природных строительных материалов. Эти минералы имеют слоистое строение из тонких пластинчатых кристаллов и характеризуются наличием локализованных очагов скопления трещин с характерными размерами от десятков до сотен микрометров. В образцах миллиметровой толщины места скопления микротрещин в объеме могут быть обнаружены при просвечивании образцов видимым светом. Фотографии исследуемых образцов толщиной H и оптические изображения исследуемых зон с выходом микротрещин на поверхность образцов представлены на рис. 1. Таким образом, были визуально определены возможные зоны максимальной концентрации микротрещин в объеме образцов. Номера этих зон указаны цифрами 1 и 2 на фотографиях и оптических изображениях на рис. 1. Затем были проведены исследования внутренней структуры этих зон с использованием рентгеновской компьютерной томографии и предлагаемого акустического метода с лазерной генерацией ультразвука.

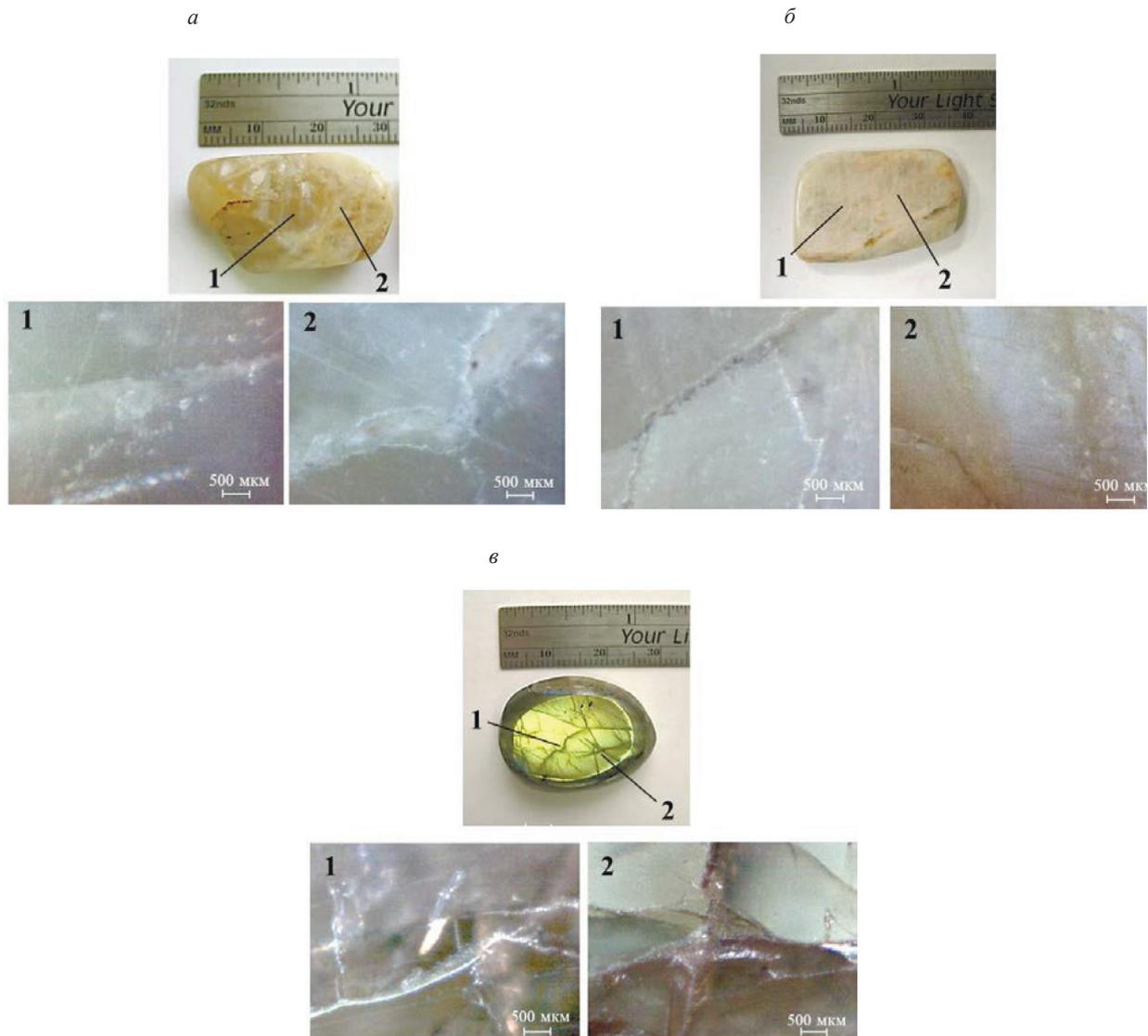


Рис. 1. Фотографии образцов полевых шпатов толщиной H и оптические изображения исследованных зон в каждом образце: ортоклаз № 1, $H = 11,3$ мм (а); ортоклаз № 2, $H = 6,2$ мм (б); плагиоклаз № 3, $H = 8,5$ мм (в).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Для исследования внутренней структуры образцов методом рентгеновской компьютерной томографии использовался трехмерный микротомограф (измерительный сканер) Yamato TDM1000/H-II (Yamato Scientific, Япония), работающий по принципу конусного луча 3-го поколения (метод Фельдкампа). Этот микротомограф ранее успешно применялся для изучения особенностей структуры неоднородных грунтов и строительных материалов различного состава (см., например, [32, 33]). Характерные размеры образцов для исследования структуры ограничены техническими возможностями микротомографа и варьируются от 100 мкм до 5 см. Габариты образцов определяют увеличение съемки и размер изучаемой внутренней зоны. Уменьшение размеров съемки по отношению к общим габаритам образца приводит к возрастанию шума и артефактов в процессе обработки сигнала, в результате чего изображение структуры исследуемой внутренней зоны образца оказывается размытым и менее контрастным. Чем больше характерные размеры образца, тем больше линейный размер вокселя на получаемом рентгеновском изображении и тем хуже пространственное разрешение на этом изображении. Поэтому оптимальный размер образца должен определяться целью исследования, а размер изучаемых неоднородностей его структуры при этом должен более чем в три раза превышать линейный размер вокселя. Ниже в таблице приведены данные о размерах образцов и изучаемых областей, обеспечивающих получение наиболее контрастных изображений с помощью данного микротомографа.

Максимальный линейный размер исследуемых в настоящей работе образцов полевых шпатов варьируется от 20 до 30 мм (см. рис. 1), поэтому размеры исследуемых областей в каждом образце составляют порядка 20 мм. Соответственно, съемка с помощью данного микротомографа позволяет выявить структурные неоднородности с размерами более 130 мкм (данная оценка сделана как трехкратный линейный размер соответствующего вокселя).

Таблица 1

Рекомендуемые размеры образца и изучаемых областей для съемки в рентгеновском микротомографе Yamato TDM1000/H-II при разных увеличениях

Увеличение	Линейный размер образца, мм	Линейный размер исследуемой области, мм	Линейный размер вокселя при разрешении 512 вокселей в каждом направлении, мкм
×4	50	45	87,9
×8	25—30	22,5	43,9
×16	12—15	11,2	22,0
×32	6—10	5,6	11,0
×64	3—5	2,8	5,5
×128	2—3	1,4	2,8

Для реализации ультразвукового неразрушающего контроля локальной микротрещиноватости образцов полевых шпатов используется специальный преобразователь [29], модифицированный для исследования материалов, в которых невозможно непосредственно генерировать ультразвуковые импульсы из-за слабого поглощения лазерного излучения (рис. 2). Источником ультразвука (оптико-акустическим (ОА) источником) служит пленка из черного полиэтилена, приклеенная на фронтальную плоскую поверхность призмы-звукопровода из оргстекла. Ультразвуковые импульсы в полиэтиленовой пленке генерировались при поглощении импульсов Nd:YAG-лазера с модуляцией добротности [29]. В результате поглощения лазерного импульса в пленке формируются два идентичных импульса продольных ультразвуковых волн, которые распространяются в противоположных направлениях от облучаемой поверхности пленки. Амплитуда и спектр этих импульсов определяются коэффициентом поглощения лазерного излучения в полиэтилене, его теплофизическими свойствами, временной зависимостью интенсивности лазерных импульсов, и отношением акустических импедансов полиэтилена и оргстекла. Один

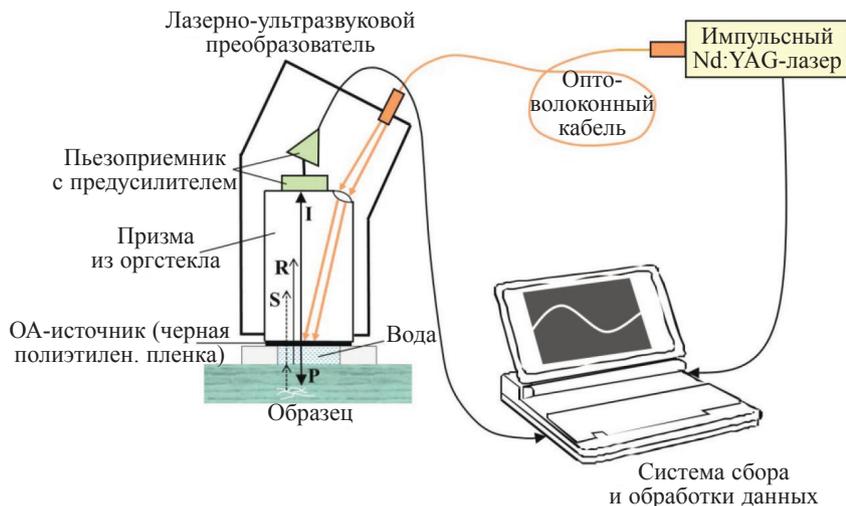


Рис. 2. Блок-схема установки для исследования локальной трещиноватости образцов минералов.

ультразвуковой импульс I (см. рис. 2) распространяется непосредственно в призму по направлению к пьезоприемнику и в дальнейших измерениях не используется, другой импульс P (зондирующий импульс) распространяется вперед, проходит через иммерсионный слой дистиллированной воды между пленкой и образцом, и затем попадает в образец. Часть этого импульса отражается на границе вода/образец, распространяется в обратном направлении через воду, полиэтиленовую пленку и призму-звукопровод и также регистрируется пьезоприемником (опорный импульс R , см. рис. 2). Зондирующий импульс P , распространяющийся в образце, претерпевает рассеяние на структурных неоднородностях образца, например, на микротрещинах или зернах. Временной трек ультразвуковых импульсов S (см. рис. 2) формируется из сигналов, обратно рассеянных структурными неоднородностями, которые распределены в образце по всей толщине прозвучивания; совокупность таких сигналов является структурным шумом. В данном случае временное окно регистрации структурного шума соответствует пробегу зондирующего импульса P по всей толщине образца от облучаемой до противоположной его поверхности и в обратном направлении. Пространственное разрешение в плоскости образцов определяется характерным радиусом ультразвукового пучка на облучаемой поверхности образца (порядка 2—3 мм) и позволяет обнаруживать зоны повышенной локальной микротрещиноватости в структурно-неоднородных геоматериалах. Частота повторения лазерных импульсов равна 1 кГц, ультразвуковой сигнал для последующей обработки получается при 100-кратном усреднении, поэтому время одного измерения составляет порядка 0,1 с.

Для оценки микротрещиноватости в прозвученной зоне образца используется временной трек совокупности импульсов R и S и такой же трек, зарегистрированный от однородной пластины из плавленого кварца, помещаемой вместо изучаемого образца. Поскольку плавленый кварц акустически однороден, мы полагаем, что структурный шум в нем отсутствует и временная форма ультразвукового импульса для кварца повторяет форму зондирующего импульса P , за исключением амплитуды, меняющейся при отражении от границы кварц/вода. В дальнейших расчетах в качестве опорного импульса R берется сигнал от кварцевой пластины.

Временные треки нормированных по амплитуде сигналов от кварцевой пластины, ортоклаза № 1 и плагиоклаза № 3 от зон визуально наблюдаемых существенных скоплений микротрещин (зоны 2) представлены на рис. 3а. Сигналы, обратно рассеянные микротрещинами на различных глубинах в образце, регистрируются в форме нерегулярных пиков, следующих за «телом» опорного импульса R , и являются структурным шумом. Для контроля степени микротрещиноватости используется спектральный анализ трека ультразвукового сигнала длительности, соответствующей времени прохода зондирующего импульса от облучаемой поверхности образца до тыльной и обратно. На рис. 3б представлены спектры таких треков рассматриваемых сигналов. Предлагаемый метод не требует регистрации временной формы ультразвукового импульса, отраженного от тыльной поверхности образца. Поэтому он может использоваться при исследовании

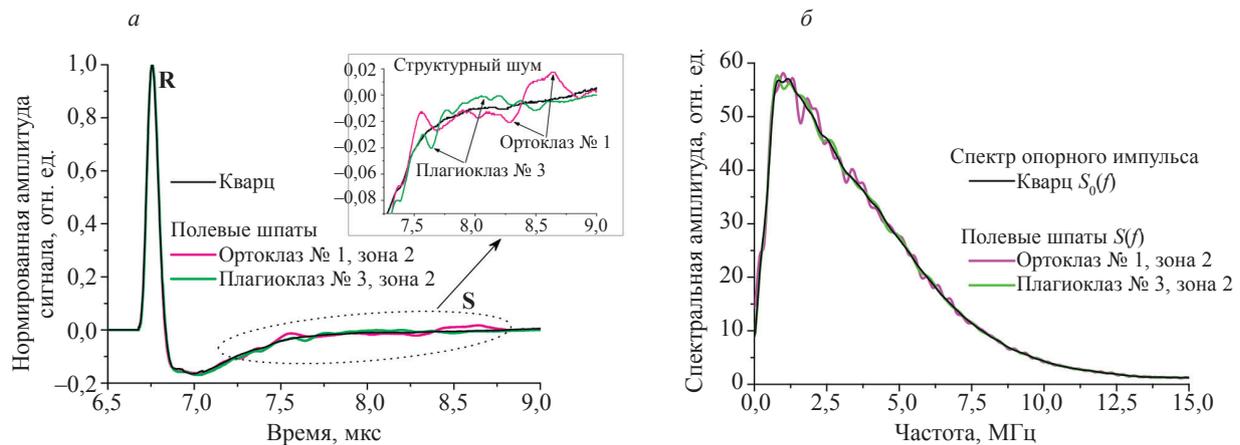


Рис. 3. Примеры ультразвуковых сигналов для кварцевой пластины и для образцов ортоклаза № 1 (зона 2) и плагиоклаза № 3 (зона 2): временные профили (а); соответствующие частотные спектры (б). **R** — опорный импульс от кварцевой пластины, **S** — структурный шум в образцах.

образцов минералов с одной плоской поверхностью, которая соприкасается с иммерсионной жидкостью и через которую зондирующий ультразвуковой импульс вводится в образец. Требование наличия плоской входной поверхности необходимо для корректного измерения мощности структурного шума, поскольку ее шероховатость или кривизна могут исказить форму вводимого зондирующего импульса и, соответственно, повлиять на результаты измерений.

Спектр $S(f)$ временного трека сигнала от исследуемого образца формируется спектрами зондирующего импульса и структурного шума; последний представляется в виде нерегулярных осциллирующих всплесков на фоне гладкого спектра опорного импульса (см. рис. 3б). Спектр зондирующего импульса $S_0(f)$ совпадает со спектром опорного импульса **R** от кварцевой пластины, а спектр структурного шума определяется временной формой сигналов, обратно рассеянных на микротрещинах в прозвученной зоне образца. Мы полагаем, что возрастание амплитуды этих сигналов и соответствующей амплитуды осцилляций в спектре $S(f)$ обусловлено возрастанием микротрещиноватости. Рассмотрим величину:

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

которая характеризует мощность структурного шума в рабочем спектральном диапазоне преобразователя от $f_{\min} = 0,2$ МГц до $f_{\max} = 15$ МГц. Вклад в величину W вносят все сигналы, рассеянные на разноразмерных микротрещинах, локализованных в прозвученной зоне образца, без разделения вкладов от микротрещин конкретного размера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчета величины W в исследованных зонах образцов минералов в качестве $S_0(f)$ был взят спектр, усредненный по четырем импульсам для произвольно выбранных зон в кварцевой пластине. Разница между полученным $S_0(f)$ и спектром каждого из четырех импульсов представляет собой мощность «аппаратного» шума W_0 , вычисленную по формуле (1), где в качестве $S(f)$ берутся спектры каждого из четырех импульсов. Отличное от нуля значение W_0 связано с электрическими наводками и шумами цифровой дискретизации сигналов, а также зависит от некоторой нестабильности временной формы интенсивности лазерного импульса и соответствующего ультразвукового импульса, генерируемого в полиэтилене для разных зон кварцевой пластины. Усреднение W_0 по четырем реализациям дает величину $\langle W_0 \rangle \approx 1,3 \cdot 10^{-5}$, которая может рассматриваться как погрешность определения мощности структурного шума W для образцов минералов.

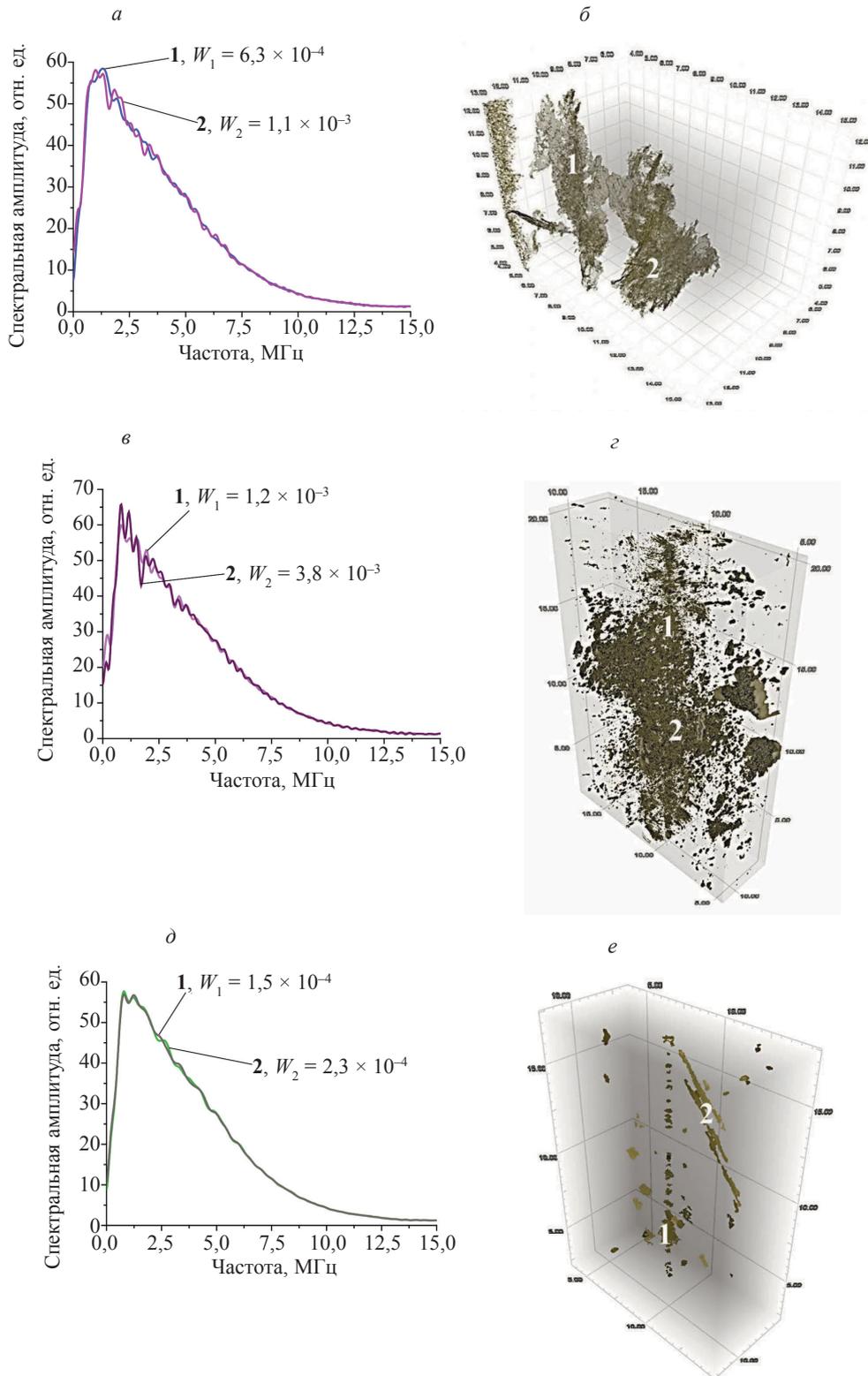


Рис. 4. Спектры $S(f)$ ультразвуковых импульсов и соответствующие значения мощности структурного шума $W_{1,2}$ в исследованных зонах 1 и 2 образцов полевых шпатов (а, в, д) и рентгеновские микротомографические изображения этих зон (б, г, е): ортоклаз № 1 (а, б); ортоклаз № 2 (в, г); плагиоклаз № 3 (д, е).

На рис. 4 представлены спектры $S(f)$ ультразвуковых импульсов для исследованных зон 1 и 2 всех образцов полевых шпатов с указанием рассчитанных по формуле (1) мощностей структурно-

го шума $W_{1,2}$ и соответствующие рентгеновские микро-томографические изображения этих зон. Видно, что величины $W_{1,2}$ для всех образцов на один-два порядка превышают мощность «аппаратного» шума $\langle W_0 \rangle$. Для рентгеновских изображений выбрано специальное контрастное представление, чтобы исключить фоновое изображение однородной структуры и показать только скопления неоднородностей в исследованных зонах каждого образца. Необходимость такого представления обусловлена тем, что традиционные рентгеновские изображения структуры исследованных образцов имели достаточно низкий контраст из-за их неосесимметричной геометрии образцов, т.е. размеры образцов в поперечной плоскости существенно превышали толщину. Как известно, требование осесимметричной геометрии образцов (цилиндрической или кубической) является необходимым для обеспечения максимальной контрастности получаемых рентгеновских изображений (см., например, [34]). Однако это требование далеко не всегда может быть выполнено для образцов минералов, имеющихся в наличии для проведения исследований. Результаты, представленные на рис. 4, демонстрируют корреляцию между возрастанием мощности структурного шума и плотности («густоты») неоднородностей на рентгеновских изображениях исследуемых зон в каждом образце. Такая корреляция наблюдается не только для каждого образца, но и для разных образцов с разной степенью микротрещиноватости в целом. Например, максимальные значения мощности структурного шума наблюдаются для образца ортоклаза № 2, рентгеновские изображения которого демонстрируют максимальную плотность структурных неоднородностей (рис. 4в, з). Обратная ситуация имеет место для образца плагиоклаза № 3 — минимальные значения мощности структурного шума соответствуют минимальной плотности структурных неоднородностей (рис. 4д, е). Таким образом, возрастание мощности структурного шума, обусловленное увеличением эффективности обратного рассеяния ультразвуковых сигналов, действительно определяется возрастанием локальной концентрации микротрещин в образцах полевых шпатов.

В данной работе впервые проведена верификация лазерного оптико-акустического метода по выявлению очагов скоплений микротрещин в минералах объективно независимым методом рентгеновской компьютерной томографии образцов сложной геометрической формы с использованием специальной высококонтрастной обработки рентгеновских изображений. Поэтому установленная корреляция между возрастающей мощностью структурного шума и увеличением локальной концентрации микротрещин действительно может быть полезной при разработке феноменологических теорий разрушения горных пород при воздействии нагрузок, а также может использоваться для выработки объективных критериев прогнозирования опасных разрушений горных пород и минералов. В данной работе сопоставление результатов ультразвуковых исследований и данных рентгеновской компьютерной томографии выполнено на качественном уровне. Для получения количественной связи мощности структурного шума с уровнем локальной концентрации микротрещин или других структурных неоднородностей в образцах на основе результатов рентгеновской компьютерной томографии необходимо иметь данные о плотности твердой фазы каждого образца, что весьма затруднительно для минералов или горных пород переменного химического состава. Тем не менее такая задача является актуальной и ее решение может являться предметом дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика акустического неразрушающего контроля локальной микротрещиноватости лабораторных образцов минералов с использованием лазерной генерации ультразвука. Измеряется спектральная мощность ультразвуковых импульсов, обратно рассеянных микротрещинами, локализованными в зоне прозвучивания (мощность структурного шума). Регистрация этих импульсов осуществляется при наличии только одной плоской поверхности образцов без необходимости определения их толщины и детектирования донного эхо-сигнала. Пространственное разрешение в плоскости образцов соответствует характерному радиусу ультразвукового пучка на поверхности образца (порядка 2-3 мм), что позволяет обнаруживать зоны повышенной трещиноватости в структурно-неоднородных геоматериалах. Впервые проведена верификация предлагаемого лазерного оптико-акустического метода с использованием независимого метода рентгеновской компьютерной томографии. Получено подтверждение того, что увеличение мощности структурного шума действительно обусловлено возрастанием локальной микротрещиноватости в объеме образцов. Таким образом, установленная связь между локальной микротрещиноватостью и мощностью структурного шума может применяться в системах объективного анализа трещинообразования в минералах и горных породах при воздействии различных нагрузок.

Исследования образцов минералов методом рентгеновской компьютерной томографии проведены на микротомографе Yamato TDM1000/Н-II, приобретенном в рамках реализации Программы развития Московского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *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.
3. *Кривошеев И.А., Шамурина А.И.* Чувствительный метод контроля изменения трещиноватости в массиве горных пород // *Дефектоскопия.* 2013. № 9. С. 62—67.
4. *Yin P., Wong R.H., Chau K.T.* Coalescence of two parallel pre-existing surface cracks in granite // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2014. V. 68. P. 66—84.
5. *Кривошеев И.А., Шамурина А.И.* Контроль образовавшихся несплошностей в образце твердого тела акустическим методом // *Дефектоскопия.* 2017. № 9. С. 29—34.
6. *Лавров А.В., Шкуратник В.Л.* Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. Приложение. С. 6—18.
7. *Кривошеев И.А.* Метод связанных диполей для локации источников акустической эмиссии // *Дефектоскопия.* 2007. № 6. С. 37—44.
8. *Grosse C.U., Ohtsu M.* (eds.) *Acoustic emission testing: Basics for research — applications in civil engineering.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 406 p.
9. *Builo S.I., Builo B.I., Chebakov M.I.* Probabilistic-Information Approach to Assessing the Reliability of the Results of the Acoustic-Emission Method of Testing and Diagnostics // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2021. V. 57. No. 5. P. 375—382. [*Буйло С.И., Буйло Б.И., Чебаков М.И.* Вероятностно-информационный подход к оценке достоверности результатов акустико-эмиссионного метода контроля и диагностики // *Дефектоскопия.* 2021. № 5. С. 37—44.]
10. *Aki K., Richards P.G.* *Quantitative seismology* (2nd ed.). CA: Univ. Sci. Books, 2009. 742 p.
11. *Meglis I.L., Chow T., Martin C.D., Young R.P.* Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2005. V. 42. No. 1. P. 25—34.
12. *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.
13. *Nicco M., Holley E.A., Hartlieb P., Kaunda R., Nelson P.P.* Methods for characterizing cracks induced in rock // *Rock Mech. Rock Eng.* 2018. V. 51. No. 7. P. 2075—2093.
14. *Николенко П.В., Шкуратник В.Л., Ченур М.Д.* Закономерности изменения скоростей упругих волн в горных породах различной пористости при механическом и термическом нагружении по данным лабораторных экспериментов // *ФТПРПИ.* 2020. № 5. С. 21—32.
15. *Abbakumov K.E., Vagin A.V., Sidorenko I.G.* Acoustic Characteristics of Solid Elastic Media with Oriented Microcracking // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2023. V. 59. No. 4. P. 393—403. [*Аббакумов К.Е., Вагин А.В., Сидоренко И.Г.* Акустические характеристики твердых упругих сред с ориентированной микротрещиноватостью // *Дефектоскопия.* 2023. № 4. С. 3—13.]
16. *Kim K.-B., Hsu D.K., Barnard D.J.* Estimation of porosity content of composite materials by applying discrete wavelet transform to ultrasonic backscattered signal // *NDT & E Int.* 2013. V. 56. P. 10—16.
17. *Karabutov A.A., Podymova N.B.* Nondestructive porosity assessment of CFRP composites with spectral analysis of backscattered laser-induced ultrasonic pulses // *J. Nondestruct. Eval.* 2013. V. 32. P. 315—324.
18. *Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Воронкова Л.В., Шалимова Е.В.* Структурный шум в ультразвуковой дефектоскопии. М.: Изд. дом МЭИ, 2016. 186 с.
19. *Романишин Р.И., Романишин И.М.* Оценка рассеянной поврежденности конструкционных материалов // *Дефектоскопия.* 2019. № 2. С. 25—35.
20. *Khlybov A.A., Uglov A.L.* On the Use of Structural Noise Parameters in Testing 20GL Steel with Rayleigh Surface Waves under Elastoplastic Deformation // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2021. V. 57. No. 7. P. 517—524. [*Хлыбов А.А., Углов А.Л.* Об использовании параметров структурного шума при контроле поверхностными акустическими волнами Рэяля стали 20ГЛ в процессе упругопластического деформирования // *Дефектоскопия.* 2021. № 7. С. 3—10.]
21. *Khlybov A.A., Uglov A.L., Demchenko A.A.* On Spectral-Acoustic Method for Estimating Porosity of Metals Produced by Hot Isostatic Pressing // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2022. V. 58. No. 12. P. 1051—1063. [*Хлыбов А.А., Углов А.Л., Демченко А.А.* О спектрально-акустическом способе оценки пористости металлов, полученных методом горячего изостатического прессования // *Дефектоскопия.* 2022. № 12. С. 3—16.]
22. *Vary A.* Material property characterization / In: Moore P.O. (ed.) *Nondestructive testing handbook. Ultrasonic testing.* Columbus: ASTM, 2007. P. 365—431.
23. *Fitting D.W., Adler L.* *Ultrasonic spectral analysis for nondestructive evaluation.* New York: Plenum Press, 1981. 354 p.

24. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
25. 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.
26. Белов М.А., Черепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л., Карабутов А.А., Макаров В.А., Подымова Н.Б. Количественная оценка размеров минеральных зерен методом лазерной ультразвуковой спектроскопии // ФТПРПИ. 2003. № 5. С. 3—8.
27. Исмагилов И.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И., Мигачев С.А., Хасанов А.А. Обнаружение поверхностных и объемных дефектов в металлах лазерно-акустическим способом // Дефектоскопия. 2014. № 6. С. 16—24.
28. Karabutov A.A., Podymova N.B. Nondestructive porosity assessment of CFRP composites with spectral analysis of backscattered laser-induced ultrasonic pulses // J. Nondestruct. Eval. 2013. V. 32. P. 315—324.
29. Подымова Н.Б., Калашиников И.Е., Кобелева Л.И. Лазерный оптико-акустический метод количественной оценки пористости литых дисперсно-упрочненных металломатричных композиционных материалов // Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 3—13.
30. Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Влияние трещиноватости полевых шпатов на спектральную мощность обратнорассеянных широкополосных импульсов продольных ультразвуковых волн // Акустический журнал. 2022. Т. 68. № 6. С. 679—688.
31. Brown J.M., Angel R.J., Ross N.L. Elasticity of plagioclase feldspars // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2016. V. 121. P. 663—675.
32. Усов А.Н., Чернов М.С., Соколов В.Н., Вознесенский Е.А. Изменение микростроения глинистых грунтов при деформировании в условиях трехосного сжатия с учетом проявления деформационной неустойчивости // Вестник Моск. университета. Сер. 4: Геология. 2017. № 6. С. 87—91.
33. Morozov I., Zakusin S., Kozlov P., Zakusina O., Roshchin M., Chernov M., Boldyrev K., Zaitseva T., Tyupina E., Krupskaya V. Bentonite-concrete interactions in engineered barrier systems during the isolation of radioactive waste based on the results of short-term laboratory experiments // Appl. Sci. 2022. V. 12. No. 6. Art. 3074.
34. Buzug T.M. Computed tomography. From photon statistics to modern cone-beam CT. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 522 p.