

DOI: 10.17073/2500-0632-2018-4-10-20

Карабутов А.А. (Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов», Москва, Россия; Международный учебно-научный лазерный центр (МЛЦ) Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия)

Черепецкая Е.Б. (Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов», Москва, Россия)

Кравцов А.Н. (Чешский технический университет, Прага, Чехия)

Арригони М. (ENSTA-Bretagne, Брест, Франция)

Методы исследования структуры и свойств горных пород на образцах (краткий обзор)

Описаны некоторые неразрушающие методы контроля внутренней структуры горных пород и приведены примеры их использования. Приведены также примеры использования рентгеновской и нейронной томографии, сканирующей электронной и акустической микроскопии. Показано, что перспективным является метод лазерно-ультразвуковой структуроскопии. Приведены два примера использования последнего: измерение локальной пористости образцов геоматериалов и контроль изменения внутренней структуры в результате электромагнитного воздействия.

Ключевые слова: горные породы, геоматериалы, рентгеновская и нейтронная томография, лазерно-ультразвуковая структуроскопия

Для создания инновационных технологий переработки минерального сырья необходимо всестороннее изучение его вещественного состава, структурных особенностей, поведения минеральных фаз в процессах рудоподготовки и обогащения.

В связи с этим при создании ресурсосберегающих технологий процессов обогащения появляется необходимость развивать методы исследований фазового состава и структуры минерального сырья, которые бы позволили добиться минимальных энергозатрат при разрушении и выделении минеральных агрегатов и одновременно избежать их переизмельчения.

На сегодняшний день актуальными задачами становятся развитие технологий получения новой информации о структуре, составе и свойствах природного минерального сырья и разработка новых неразрушающих методов, которые позволяли бы проводить исследования образцов без предварительной процедуры пробоподготовки. Это значительно бы повысило достоверность и информатив-

ность определяемых характеристик. К таким методам относятся интроскопические методы неразрушающего контроля, включающие рентгеновскую и нейтронную томографию [1–7], ультразвуковые методы [8, 9], электронную и акустическую микроскопию [10–14], лазерно-ультразвуковую структуроскопию [15–17].

Каждый из данных методов имеет свои достоинства и недостатки. Остановимся подробнее на некоторых из них.

1. Рентгеновская томография

Рентгеновская томография гетерогенных сред основана на восстановлении пространственного распределения коэффициента линейного ослабления рентгеновского излучения посредством компьютерной обработки получаемых при просвечивании излучением проекций слоя вещества, состоящего из различных по плотности и химическому составу элементов [1–3].

В результате такой реконструкции визуализируется внутренняя трехмерная микроструктура образца. Линейные раз-

меры элементов, их число, сферичность, анизотропия определяются с помощью специального программного обеспечения.

Рентгеновская томография на порядок более чувствительна к локальным неоднородностям, чем рентгенография. Пространственное разрешение современных микротомографов составляет единицы–десятки микрон, что соответствует размерам кристаллов и пор в образцах геоматериалов.

Дефекты структуры в виде пор, трещин, неоднородностей, газовой-жидких включений могут быть выявлены как на отдельных сечениях, так и по всему объему изучаемого образца. Данный метод позволяет также определить минераль-

ный состав, определить распределение фаз и дефектов, получить количественные значения числа пор, микротрещин, частиц и т.д., измерить их линейные размеры, объемы, площадь поверхности, форму.

В качестве иллюстрации возможностей данного метода приведены микротомографии образца гнейсо-гранита до и после механического воздействия (рис. 1) [18]. На них четко видно, что в результате механического воздействия происходит трансформация структуры порового пространства: первичные поры частично смыкаются и появляются новые поры и микротрещины, размеры, количество и форма которых зависят от свойств минеральной фазы.

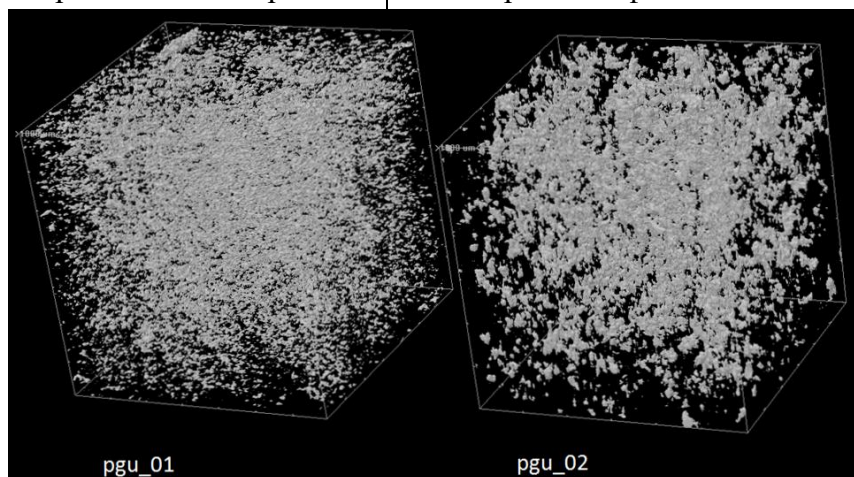


Рис. 1. Строение порового пространства образца гнейсо-гранита:
pgu_01 – исходный образец; pgu_02 – образец после воздействия сжимающей нагрузки [18]

Томографическое изучение продуктов разрушения позволило сделать вывод, что вторичная (приобретенная в результате дезинтеграции) пористость горных пород зависит от применяемого способа дробления и типа дробильного оборудования. Полученные результаты послужили основой для разработки энерго-сберегающих технологий дезинтеграции горных пород применительно к их текстурно-структурным типам.

Недостатками метода рентгеновской томографии являются длительность получения изображения (3–12 ч в зави-

симости от мощности рентгеновского излучения) и невозможность идентификации неконтрастных для рентгена минеральных фаз (сфалерит, пирит, сера, кальцит и некоторые другие).

2. Нейтронная томография

Нейтронная рефлектометрия и томография при изучении структуры и свойств гетерогенных сред используют особенности взаимодействия нейтронного излучения с веществом [5–7]. Заряд электронной оболочки атома не влияет на амплитуду рассеяния нейтронов, как это имеет место в случае гамма- и рентгенов-

ского излучений, что позволяет применять нейтронное излучение для диагностики элементов с малым зарядом, где оно оказывается значительно более чувствительным, чем указанные излучения [7]. Более того, наличие у нейтрона магнитного момента делает этот вид излучения незаменимым при изучении магнитных свойств горных пород. Отсутствие заряда у нейтрона приводит к тому, что данный тип излучения отличается более высокой проникающей способностью в геоматериалах, что дает возможность зондировать значительно большие глу-

бины, чем при использовании рентгеновского излучения [7].

Нейтронная томография позволила восстановить объемный металлический «каркас» метеорита, не разрушая столь ценный объект исследования (рис. 2) [5]. Минимальный размер неоднородностей составлял 200 мкм, время одного измерения – 10 с.

Изображения групп минералов, горных и осадочных пород, неразличимых в стандартной рентгеновской томографии, приведены на рис. 3 [6, 7].

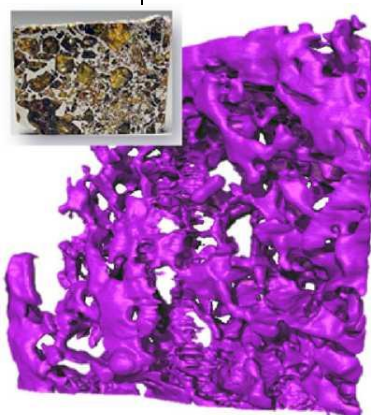


Рис. 2. Восстановленная с помощью нейтронной томографии трехмерная модель распределения железоникелевого сплава в метеорите Сеймчан. На врезке представлена реальная фотография метеорита [5]

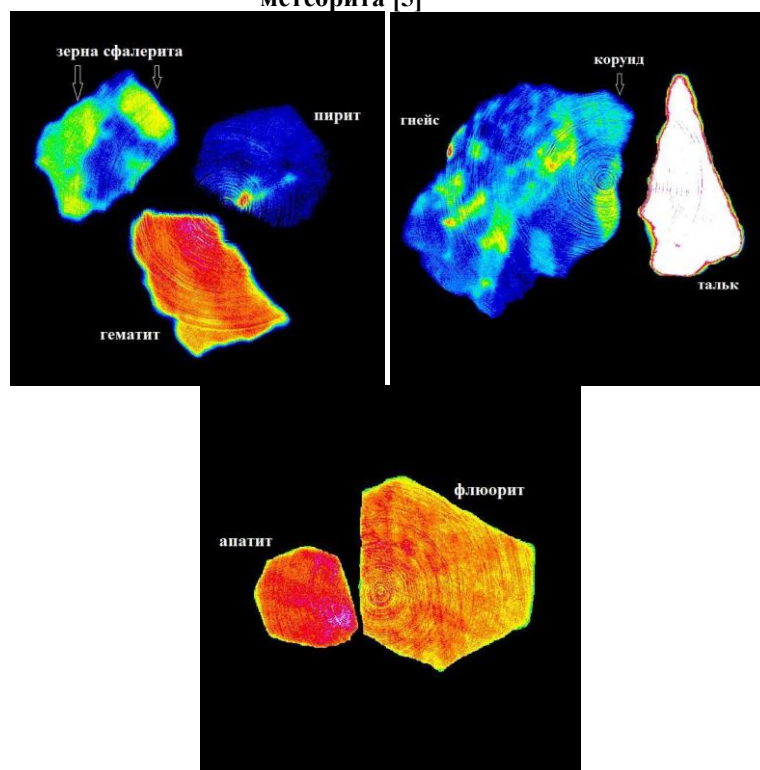


Рис. 3. Изображения групп минералов, горных и осадочных пород, неразличимых в стандартной рентгеновской томографии, полученные методом нейтронной томографии [7]

Следует отметить, что существует ряд объективных препятствий на пути широкого практического применения нейтронной радиографии и томографии. Прежде всего, это относительная недоступность исследовательских ядерных реакторов. Более того, данные сложнейшие установки требуют для обслуживания многочисленного персонала высокой квалификации.

3. Электронная микроскопия

В электронной микроскопии используются две формы взаимодействия электронного пучка с исследуемым материалом. Первая из них – упругое взаимодействие, благодаря которому строится изображение в просвечивающем электронном микроскопе. Этот метод дает возможность обнаружить такие дефекты в кристаллах, как дислокации, границы зерен и т.д. Процессы неупругого рассеяния электронного пучка определяют контраст изображения при исследовании структуры поверхности образцов гетерогенных сред в сканирующем электронном микроскопе.

Напряжение, ускоряющее электроны, в первых просвечивающих микроскопах составляло 30–60 кВ; а толщина исследуемых образцов едва достигала 1000 Å. В настоящее время созданы электронные микроскопы с ускоряющим напряжением в 3 МВ, что позволяет наблюдать объекты толщиной уже в несколько микрометров.

Непосредственно методом просвечивающей электронной микроскопии

первыми были изучены слюда и глинистые минералы. Данный метод микроскопии позволяет определять по форме глинистых частиц их минеральный состав и дает представление о размере частиц. Одними из первых электронную микроскопию для описания структуры минералов использовали Риббе, МакКоннел и Флит [10, 11]. В 1970 г. работы по исследованию образцов лунного грунта на основе электронной микроскопии привели к возникновению необыкновенного бума при использовании данного метода для исследования минералов. Полученные в течение последующих нескольких лет результаты оказали сильное влияние на всю современную минералогию. На сегодняшний день расшифровано строение пироксенов и полевых шпатов, почти в каждой группе минералов исследования с помощью электронной микроскопии приводят к ряду неожиданных свойств [10, 11].

В качестве примера на рис. 4 приведено изображение поверхности образца гранита.

В качестве достоинства электронной микроскопии следует отметить, что с ее помощью текстуру и структуру геоматериалов можно изобразить в реальном пространстве, а не получать эти данные путем расчета дифракционных картин. Однако электронная микроскопия не заменяет, а дополняет исследования, проводимые методами рентгеновской дифракции.

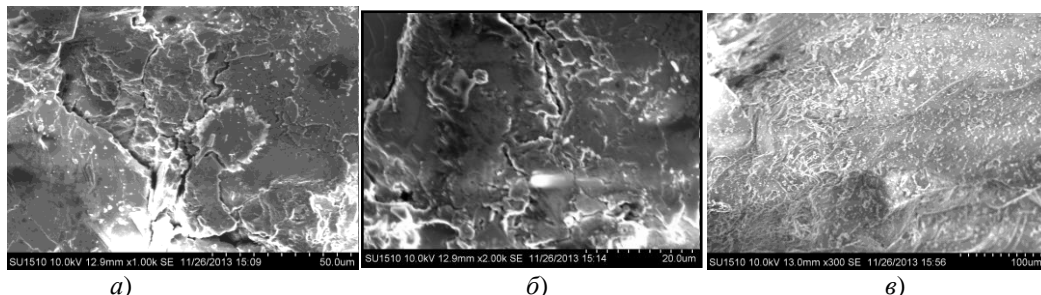


Рис. 4. Изображения поверхности микроклина (а, б) и кварца (в) в образце гранита [18], полученные с помощью электронного микроскопа

4. Акустическая микроскопия

Сканирующая акустическая микроскопия как один из интроскопических методов в последние годы интенсивно развивается [10–14]. Данный метод позволяет не только получать акустические изображения, но и измерять такие физико-механические параметры различных сред, как локальные модули упругости, коэффициенты вязкости, изучать динамику физико-химических процессов, происходящих в них. Зондирование объекта в этом методе проводится с помощью акустических волн ультразвукового и гиперзвукового диапазонов с частотами от 10 МГц до 3 ГГц. Разрешение акусти-

ческих микроскопов практически сравнимо с разрешением оптических, но в отличие от последних используется для непрозрачных сред. При повышении при низких температурах рабочей частоты ультразвука до десятков гигагерц расширяющаяся способность акустических микроскопов приближается к разрешению электронных микроскопов.

Метод использовался для изучения локальных свойств геоматериалов в [13, 14], а также выполнено исследование поверхностной структуры песчаников (рис. 5) при использовании в микроскопе частоты 1 ГГц [4].

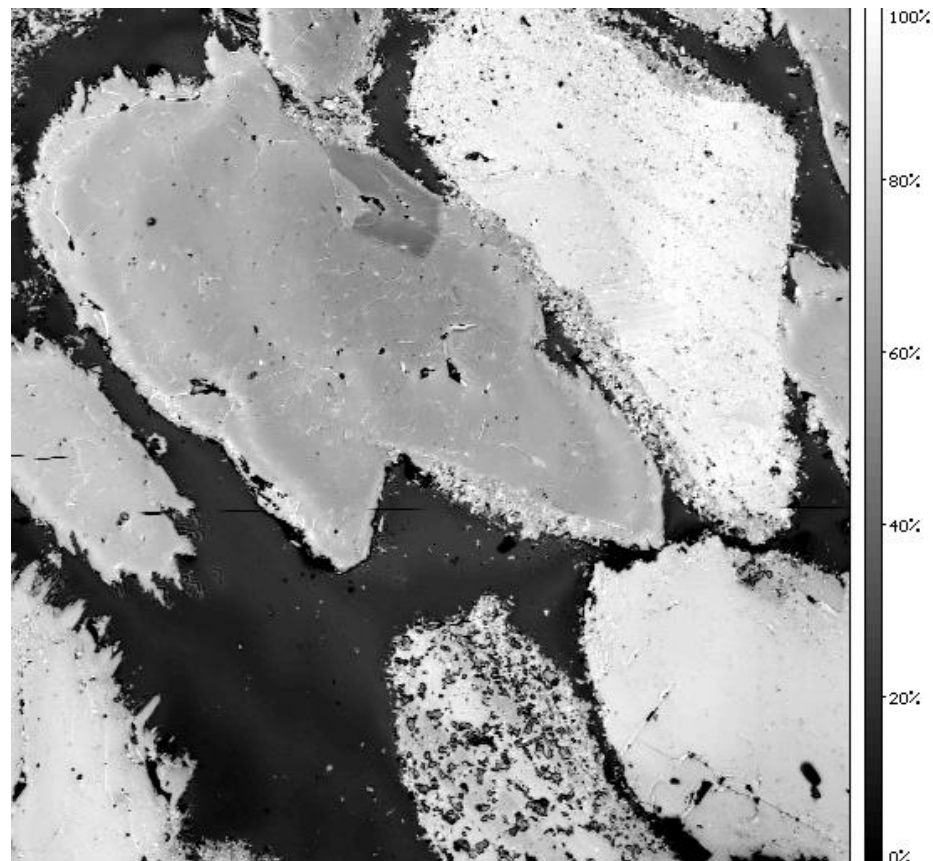


Рис. 5. Изображение песчаника, полученное методом акустической микроскопии. Показаны зерна кварца и полевого шпата, а также их сростки. Белый цвет соответствует высоким значениям волнового сопротивления, темный – низким [8]

На сегодняшний день существуют серийные приборы таких фирм как «Олимпус», «Лейтц», ФРГ; «Дилор Брукер», Франция; «Хонда», «Тошиба», Япония; «Соноскан» и «Соникс», США, и др. Основными недостатками исполь-

зования акустических микроскопов являются высокая стоимость и малая глубина проникновения упругих волн из-за сильного затухания высоких частот в гетерогенных средах.

5. Лазерно-ультразвуковая структуроскопия

Основное отличие оптико-акустической диагностики структуры гетерогенных сред от традиционных ультразвуковых методов заключается в лазерном возбуждении коротких импульсов упругих волн со строго контролируемой формой и широкополосном пьезоэлектрическом приеме рассеянных неоднородностями сигналов [9, 20, 14].

В этом случае оптическое излучение поглощается приповерхностным слоем жидкости или твердого тела. После-

дующее расширение нагретой области приводит к генерации акустических волн. Использование наносекундных лазерных импульсов с энергией в импульсе не более 300 мДж позволяет возбуждать импульсы упругих волн с амплитудой давления до 10 МПа и длительностью менее 100 нс.

При одностороннем доступе к образцу горных пород используется лазерно-ультразвуковой структуроскоп «ГЕОСКАН-02МУ», работающий в эхо-режиме. Блок-схема данного прибора приведена на рис. 6 [19].

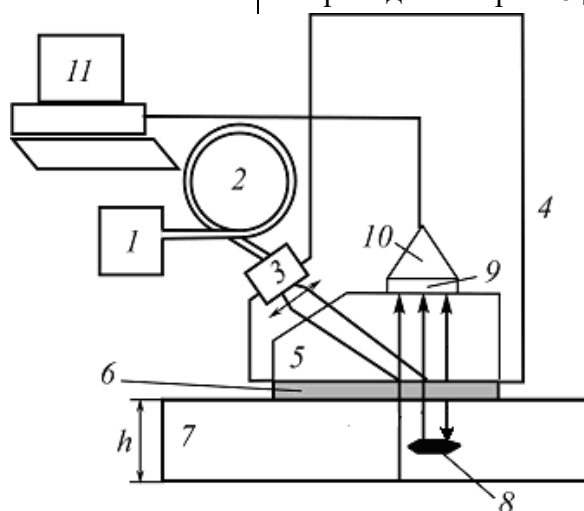


Рис. 6. Блок-схема рефлектометра ГЕОСКАН-02М: 1 — твердотельный лазер; 2 — кабель оптоволоконный; 3 — оптическая система для формирования пучка; 4 — корпус лазерно-ультразвукового преобразователя; 5 — оптически прозрачная призма; 6 — генератор в виде пластинки из черного пластика; 7 — образец горной породы; 8 — дефект в виде трещины или поры в образце; 9 — демпфированный приемник на основе пьезопленки; 10 — преусилитель; 11 — компьютер [19]

Лазерное излучение импульсно-периодического YAG:Nd лазера 1 с длительностью импульса 15 нс и максимальной энергией в импульсе $2 \cdot 10^{-4}$ Дж через оптоволоконный кабель 2 поступает в оптическую систему 3 формирования геометрических размеров пучка. Сформированный пучок диаметром 2 мм через оптически прозрачную призму 5 выполненную из оргстекла с плоскопараллельными основаниями и служащую звукопроводом для акустических сигналов, поступает на лазерно-ультразвуковой генератор 6. Система 3, призма 5 и генератор 6 закреплены в корпусе 4. Длительность

ультразвуковых импульсов, возбуждаемых при поглощении лазерного излучения генератор и последующего расширения нагретой области, имеет порядок 100 нс, а их пространственная протяженность составляет 0,5 мм. Диаметр ультразвукового пучка равен диаметру лазерного и составляет 2 мм. В генераторе возбуждаются два импульса: первый распространяется в призме и является опорным, второй — в исследуемом образце и рассматривается как зондирующий. Опорный и отраженные от дефекта 8 сигналы регистрируются широкополосным приемником 9 на основе пьезопленки. Также пьезопри-

емником 9 регистрируется сигнал от тыльной поверхности образца. Все акустические импульсы преобразуются в электрические сигналы, после чего поступают на усилитель 10 и обрабатываются компьютером 11.

Измеряется разница времен Δt_h между приходом на пьезоприемник опорного и отраженного от нижней поверхности образца сигналов, по которой определяют его толщину

$$h = c_l \Delta t_h / 2, \quad (1)$$

где c_l – скорость распространения упругих продольных волн.

Расстояние от дефекта до поверхности находится по аналогичным формулам:

$$h_d = c_l \Delta t_d / 2, \quad (2)$$

Здесь Δt_d – разница времен между приходом на пьезоприемник опорного и отраженного от дефекта импульса. Погрешность вычислений определяется ошибками измерения h и соответствующих интервалов времени и составляет менее 1 %.

Малая длительность и пространственная протяженность зондирующего

сигнала позволяют выявлять дефекты на глубине более 1 мм. «Мертвая» зона контроля при этом составляет 200 мкм.

В качестве примера приведена оценка объемной пористости образцов горных пород. Для оценки использовался структуроскоп «ГЕОСКАН-2МУ» в режиме эхоскопии.

Изображенные на рис. 7, а акустические сигналы состоят из опорного 1 и отраженного 2 от задней поверхности образца образца и «структурного» шума, который занимает на временной шкале пространство между ними. В увеличенном масштабе данный трек приведен на рис. 7, б. Именно «структурный шум» несет информацию о пористости геосреды. Рассчитывая его нормированную мощность W , можно оценить объемную пористость образца P . Оказалось, что $P(W)$ хорошо аппроксимируется квадратичной функцией:

$$P(W) = a_1 W^2 + a_2 W + a_3, \quad (3)$$

причем значения коэффициентов $a_{1,2,3}$ меняются в зависимости от образца. Значения данных коэффициентов для некоторых пород приведены в табл. 1.

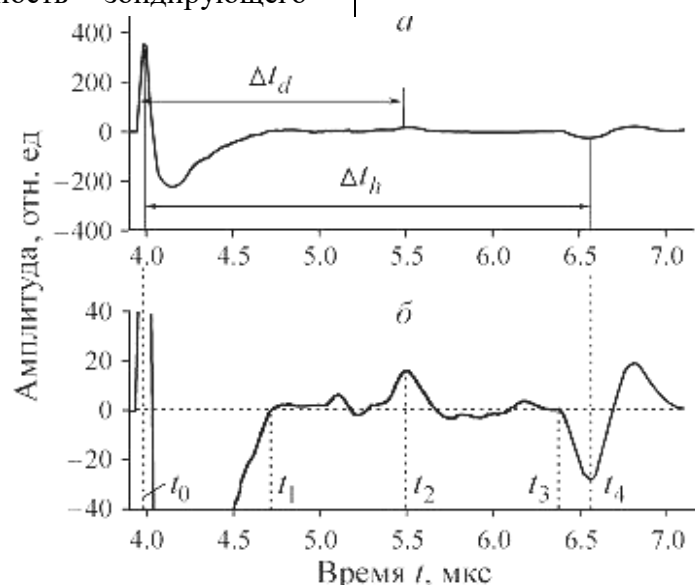


Рис. 7. Временная зависимость напряжения на усилителе, повторяющая форму давления в акустическом сигнале, полученном при эхолокации одного из образцов вулканической породы: а – полный акустический трек; б – фрагмент сигнала при десятикратном увеличении по вертикальной оси [20]

Таблица 1

Значения $a_{1,2,3}$ для базальта и известняка. [19]

Геоматериал	a_1	a_2	a_3
Базальт	$0,08 \pm 0,01$	$0,97 \pm 0,09$	$-1,3 \pm 0,2$
Известняк	$0,07 \pm 0,01$	$0,5 \pm 0,08$	$-1,7 \pm 0,14$

Таким образом, используя найденные для различных месторождений зависимости $P(W)$ как градуировочные кривые, можно проводить быструю диагностику пористости геоматериала, если ее величина не превышает двадцати процентов.

Описанная методика измерений на структуроскопе «ГЕОСКАН-02МУ» позволяет не только выявлять в образцах горных пород микродефекты, но и проводить визуализацию внутренней структуры.

Экспериментально возможности лазерной ультразвуковой спектроскопии для оценки структурных изменений в геологических объектах, обусловленных внешними причинами той или иной физической природы, были выполнены также для железистых кварцитов. Оценки

необходимы для оптимального выбора вида и режима воздействия, обеспечивающих например избирательный характер разрушения, наибольшую эффективность процессов дезинтеграции геоматериалов, ослабления связей между их отдельными компонентами.

На рис. 8 показано, как меняется первоначальная структура (a) железистого кварцита под влиянием электромагнитных импульсов, плотности энергии которых E_1 (b) и E_2 ($в$) удовлетворяют соотношению: $4E_1 = E_2$. Приведенные структурограммы убедительно свидетельствуют об эффективности лазерной ультразвуковой спектроскопии при исследовании дефектов в геоматериалах, появляющихся в результате внешних воздействий.

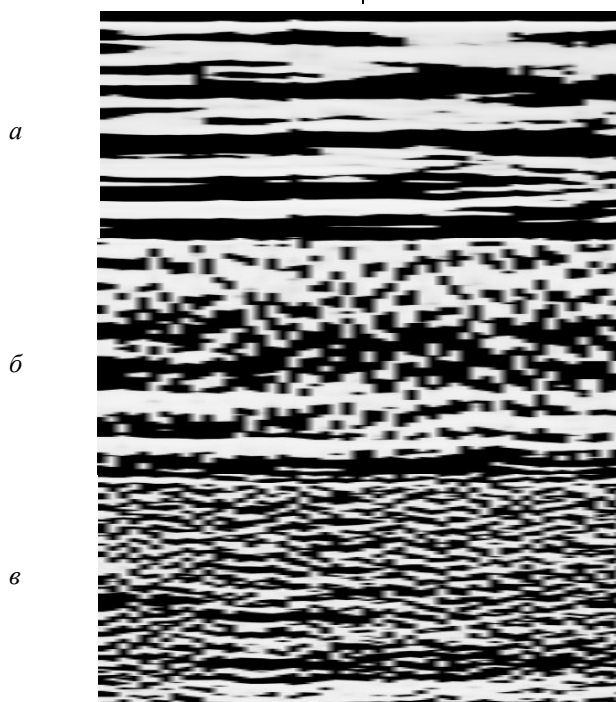


Рис. 8. Изменение первоначальной структуры (a) железистого кварцита под действием электромагнитных импульсов с плотностями энергии E_1 (b) и $4E_1$ ($в$) [20]



Заключение

В работе описаны некоторые разрушающие методы контроля внутренней структуры горных пород и приведены примеры их использования. Показано, что рентгеновская томография дает наиболее полную информацию о порах, размерах зерен. Однако для получения разрешения менее 5 мкм необходимо использовать порядка 1 см³. Нейронная томография оказывается более чувствительной при исследовании магнитных свойств геоматериалов. Информацию о структуре поверхности образцов горных пород, их элементном составе можно получить на основе сканирующей электронной микроскопии. Акустическая микроскопия позволяет определить локальные упругие характеристики образцов в приповерхностной зоне, а также строить карты распределения акустического импеданса. Перспективным является метод лазерно-ультразвуковой структуроскопии.

Приведены два примера использования последнего: измерение локальной пористости образцов геоматериалов и контроль изменения внутренней структуры в результате воздействия электромагнитного поля

Библиографический список

1. Re F., Scavia C. Determination of contact areas in rock joints by X-ray computer tomography, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, vol. 36, i. 7, pp. 883-890.
2. Lichun J., Mian C. 3D imaging of fractures in carbonate rocks using X-ray computed tomography technology, *Carbonates and Evaporites*, 2014, vol. 29, i. 2, pp. 147-153.
3. Asskar J. C., Saman S. K. Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, vol. 9, i. 5, pp. 981-988.
4. Diaz M., Yeom Kim K., Yeom S., Zhuang L., Min K., Krauß F., Giese R., Alexandrakis C., Buske S. Surface roughness characterization of open and closed rock joints in deep cores using

X-ray computed tomography, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, vol. 98, pp. 10-19.

5. Winkler, B., Knorr, K., Kahle, A., Vontobel, P., Lehmann, E., Hennion, B. and Bayon, G. Neutron imaging and neutron tomography as nondestructive tools to study bulkrock samples. *European Journal of Mineralogy*, 2002, p. 14. DOI: 10.1127/09351221/2002/00140349.
6. Hall, S.A. Characterization of fluid flow in a shear-band in porous rock using neutron radiography, *Geophysical Research Letters*, 2013, vol. 40, pp. 2613–2618.
7. Kardjilov N., Baechler S., Bastuerk M., Dierick M., Jolie J., Lehmann E., Materna T., Schillinger P., Vontobe P. New features in cold neutron radiography and tomography Part II: applied energy-selective neutron radiography and tomography, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 501, 2003, pp. 536-546.
8. Jun C., Zheng X., Yue Y., Yangping Y. Experimental characterization of granite damage using nonlinear ultrasonic techniques, *NDT & E International*, 2014, vol. 67, pp. 10-16.
9. Mesut T., Figen S.K., Yalcin U.K. Application of ultrasonic method in asphalt concrete testing for fatigue life estimation, *NDT & E International*, 2004, vol. 37, i. 8, pp. 597-602.
10. Spence J. *Experimental High-Resolution Electron Microscopy*, Oxford, 2013, pp. 300-302.
11. Balk L.J. *Scanning acoustic microscopy, Surface and Subsurface Anal.*, 1986, v.9.
12. Maev R.G. *Proceedings of 26th Acoustical Imaging Symposium: held September 9-12, 2001, in Windsor, Ontario, Canada, New York, NY, Kluwer Academic Publishers, Acoustical Imaging*, 2002, vol. 26, pp. 493-501.
13. Prasad M., Reinstaedtler M., Nur A., Walter A. *Quantitative Acoustic Microscopy: Application to petro physical study of reservoir rocks, Acoustical Imaging*, vol. 26, 2002, pp. 493-502.
14. Prasad M. *Mapping impedance microstructures in rocks with acoustic microscopy, Stanford University, Stanford*, 2001, pp. 172-179.
15. Scruby C.B., Drain L. E. *Laser Ultrasonic: Techniques and Applications*, Bristol, Adam Hilger, 1990.
16. Bernal M.T., Capporaletti G., Rebollo M.A., Quintian F.P., Raffo C.A. Determination of rocks porosity by means of nondestructive techniques that use ultrasound generated by laser, *15thWCNDT, Roma*, 2000, Available at: <http://www.nctLnet/article/wcndt00/papers/idn571/idn571.htm>

17. Wang L. Photo acoustic Imaging and Spectroscopy (Optical Science and Engineering), CRC Press, 2009, 499 p.

18. Vaisberg L.A., Kameneva E.E. Interconnection of structural features and physical-mechanical properties of rocks, *Gornyi Zhurnal*, 2017, vol. 9, pp. 53-58.

19. Gusev V. E., Karabutov A.A. Laser optoacoustics, Nauka, Moscow, 1991, 304 p.

20. Карабутов А.А., Макаров В.А., Шкуратник В.Л., Черепецкая Е.Б. Теоретическая оценка параметров ультразвуковых импульсов, возбуждаемых в геоматериалах лазерным излучением // ФТПРПИ. – 2003. – № 4. – С.11-18.

“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2018, No. 4, pp. 10-20

Title:	Methods of studying structure and properties of rocks using samples (short review)
Author 1:	A.A. Karabutov National University of Science and Technology "MISIS"; International Laser Center of M.V.Lomonosov Moscow State University 4, Leninsky Prospekt, Moscow, Russia, 119991; 1, p. 62, microdistrict Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119234
Author 2:	E.B. Cherepetskaya National University of Science and Technology "MISIS" 4, Leninsky Prospekt, Moscow, Russia, 119991
Author 3:	A.N. Kravcov Department of Construction Technology, Faculty of Civil Engineering in Prague Thákurova 7/2077, Prague 6 - Dejvice, 166 29, Czech Republic
Author 4:	M. Arrigoni ENSTA-Bretagne FRE CNRS 3744 - IRDL, Brest, F-29806, France
Abstract:	Some non-destructive methods for internal rock structures control are described, and examples of their use are given. Examples of the application of X-ray and neural tomography, scanning electron and acoustic microscopy are also presented. It is shown that the method of laser-ultrasonic structuroscopy is rather promising. Two examples of the use of laser-ultrasonic structuroscopy are given: measuring local porosity of geomaterial samples and monitoring changes of internal structure as a result of electromagnetic exposure.
Keywords:	rocks, geomaterials, x-ray and neutron tomography, laser-ultrasonic structuroscopy.
References:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Re F., Scavia C. <i>Determination of contact areas in rock joints by X-ray computer tomography</i>, <i>International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences</i>, 1999, vol. 36, i. 7, pp. 883-890. 2. Lichun J., Mian C. <i>3D imaging of fractures in carbonate rocks using X-ray computed tomography technology</i>, <i>Carbonates and Evaporites</i>, 2014, vol. 29, i. 2, pp. 147-153. 3. Asskar J. C., Saman S. K. <i>Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica</i>, <i>Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering</i>, 2017, vol. 9, i. 5, pp. 981-988. 4. Diaz M., Yeom Kim K., Yeom S., Zhuang L., Min K., Krauß F., Giese R., Alexandrakis C., Buske S. <i>Surface roughness characterization of open and closed rock joints in deep cores using X-ray computed tomography</i>, <i>International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences</i>, 2017, vol. 98, pp. 10-19. 5. Winkler, B., Knorr, K., Kahle, A., Vontobel, P., Lehmann, E., Hennion, B. and Bayon, G. <i>Neutron imaging and neutron tomography as nondestructive tools to study bulkrock samples</i>. <i>European Journal of Mineralogy</i>, 2002, p. 14. DOI: 10.1127/09351221/ 2002/00140349. 6. Hall, S.A. <i>Characterization of fluid flow in a shear-band in porous rock us-</i>



- ing neutron radiography, *Geophysical Research Letters*, 2013, vol. 40, pp. 2613–2618.
7. Kardjilov N., Baechler S., Bastuerk M., Dierick M., Jolie J., Lehmann E., Materna T., Schillinger P., Vontobe P. *New features in cold neutron radiography and tomography Part II: applied energy-selective neutron radiography and tomography*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 501, 2003, pp. 536-546.
 8. Jun C., Zheng X., Yue Y., Yangping Y. Experimental characterization of granite damage using nonlinear ultrasonic techniques, *NDT & E International*, 2014, vol. 67, pp. 10-16.
 9. Mesut T., Figen S.K., Yalcin U.K. *Application of ultrasonic method in asphalt concrete testing for fatigue life estimation*, *NDT & E International*, 2004, vol. 37, i. 8, pp. 597-602.
 10. Spence J. *Experimental High-Resolution Electron Microscopy*, Oxford, 2013, pp. 300-302.
 11. Balk L.J. *Scanning acoustic microscopy*, *Surface and Subsurface Anal.*, 1986, v.9.
 12. Maev R.G. *Proc. of 26th Acoustical Imaging Symposium: held September 9-12, 2001, in Windsor, Ontario, Canada, New York, NY, Kluwer Academic Publishers, Acoustical Imaging*, 2002, vol. 26, pp. 493-501.
 13. Prasad M., Reinstaedtler M., Nur A., Walter A. *Quantitative Acoustic Microscopy: Application to petro physical study of reservoir rocks*, *Acoustical Imaging*, vol. 26, 2002, pp. 493-502.
 14. Prasad M. *Mapping impedance micro-structures in rocks with acoustic microscopy*, Stanford University, Stanford, 2001, pp. 172-179.
 15. Scruby C.B., Drain L. E. *Laser Ultrasonic: Techniques and Applications*, Bristol, Adam Hilger, 1990.
 16. Bernal M.T., Capporaletti G., Rebollo M.A., Quintian F.P., Raffo C.A. *Determination of rocks porosity by means of nondestructive techniques that use ultrasound generated by laser*, *15thWCNDT, Roma, 2000*, Available at: <http://www.nctLnet/article/wcndt00/papers/idn571/idn571.htm>
 17. Wang L. *Photo acoustic Imaging and Spectroscopy* (Optical Science and Engineering), CRC Press, 2009, 499 p.
 18. Vaisberg L.A., Kameneva E.E. *Interconnection of structural features and physical-mechanical properties of rocks*, *Gornyi Zhurnal*, 2017, vol. 9, pp. 53-58.
 19. Gusev V. E., Karabutov A.A. *Laser optoacoustics*, Nauka, Moscow, 1991, 304 p.
 20. Karabutov A.A., Makarov V.A., Shkuratnik V.L., Cherepetskaya E.B. *Teoreticheskaja ocenka parametrov ul'trazvukovyh impul'sov, vzbuzhdaemyh v geomaterialah lazernym izlucheniem [Theoretical estimation of the parameters of ultrasonic pulses excited in geomaterials by laser radiation]*. FTPRPI. 2003. No. 4. Pp. 11-18.