ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(4-1):98–107
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 539.217.1+ 620.172.225 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_98

ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ОТ ПОРИСТОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗВЕСТНЯКА МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ДИАГНОСТИКИ

А. А. Галунин[1], А. А. Гапеев[1], В. Поспичал[2]

[1] Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС» Горный институт, Москва, Россия;
[2] Чешский технический университет в Праге, Чешская Республика

Аннотация: В работе проведены исследования минерального и элементного составов образцов известняка. Показано, что в образцах присутствуют в среднем 97,5 % кальцита, 2 % кварца, 0,5 % доломита, содержание остальных минералов менее 0,1 %. Для известняка данного состава найдены аналитические выражения, позволяющие связать измеренные плотность образца и скорость продольных волн со значениями плотности известняка и скорости продольных волн образца без пор того же минерального состава. По данной функциональной зависимости определены плотность и скорость продольных волн в известняке без пор; данные значения верифицированы на основе аналитического расчета с использованием уравнения Грина-Кристоффеля, выполненного для среды, состоящей из хаотически ориентированных кристаллов кальцита, кварца, доломита, которые относятся к тригональному классу симметрии. Для каждого образца найдена общая пористость, включающая закрытую и открытую. Выполнены прецизионные измерения скоростей продольных и сдвиговых волн с погрешностью менее 0,2 % на основе лазерно-ультразвуковой структуроскопии. По измеренным скоростям рассчитаны динамические модули упругости; установлено, что модули Юнга и сдвига квазилинейно зависят от пористости, а для коэффициента Пуассона не прослеживается четкой связи с пористостью. Показано, что комплекс методов, состоящий из минерального анализа образцов и лазерно-ультразвуковой диагностики, позволяет определять корреляционные связи динамических модулей упругости и общей пористости для гетерогенных сред.

Ключевые слова: динамический модуль упругости, известняк, пористость, уравнение Грина-Кристоффеля, лазерно-ультразвуковая структуроскопия, скорость волны, корреляционная связь, кристаллографические оси.

Для цитирования: *Галунин А. А., Гапеев А. А., Поспичал В.* Оценка зависимости динамических модулей упругости от пористости образцов известняка методом импульсной диагностики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4-1. — С. 98–107. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_98.

Estimation of the dependence of the dynamic modules of elasticity on the porosity of limestone samples by the method of pulse diagnostics

A. A. Galunin[1], A. A. Gapeev[1], V. Pospichal[2]

[1] National Research Technological University «MISiS» Mining Institute, Moscow, Russia;
[2] Czech Technical University in Prague, Czech Republic

© А. А. Галунин, А. А. Гапеев, В. Поспичал. 2021

Abstract: The paper addresses a study of the mineral and elemental composition of limestone specimens. On average, the specimens contain 97.5 % calcite, 2 % quartz, 0.5 % dolomite; the concentration of other minerals is less than 0.1 %. For limestone of this composition, analytical expressions are found to connect the measured density of specimens and longitudinal wave velocity with the density and longitudinal wave velocity in pore-free limestone specimens with the same mineral composition. This functional relationship is used to determine the density and longitudinal wave velocity in limestone with no pores; these values are verified using a Green-Christoffel equation for a medium consisting of chaotically oriented trigonal crystals of calcite, quartz, and dolomite. All specimens are characterized in terms of total porosity, including closed and open ones. Longitudinal and shear wave velocities are precisely measured (with an error of less than 0.2 %) by means of laser-ultrasonic structuroscopy. The measured velocities are used to calculate the dynamic elastic moduli. It is found that Young's and shear moduli depend on porosity in a quasilinear manner; there is no distinct connection between porosity and Poisson's ratio. It is demonstrated that the methods of mineral analysis of specimens and laser ultrasonic testing are able to determine the correlation between dynamic elastic moduli and total porosity of heterogeneous media.

Key words: dynamic modulus of elasticity, limestone, porosity, Green-Christoffel equation, laser-ultrasound structuroscopy, wave velocity, correlation, crystallographic axes.

For citation: Galunin A. A., Gapeev A. A., Pospichal V. Estimation of the dependence of the dynamic modules of elasticity on the porosity of limestone samples by the method of pulse diagnostics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4-1):98–107. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_98.

Введение

Природный камень широко использовался на всех этапах развития человечества при создании памятников искусства и архитектуры, а также при возведении объектов промышленного и гражданского назначения [1–4]. Примерами могут служить Московский Кремль, большинство сооружений которого выполнены из известняка, современные здания и станции метрополитена из мрамора, гранита, песчаника и т. д. Особое значение приобретают задачи подбора образцов природного камня из разрабатываемых в настоящее время месторождений для реставрации памятников архитектуры. При выборе образцов должны учитываться не только их декоративные свойства, но и близость физико-механических параметров и структурных особенностей. Среди данных параметров особое значение приобретают модули упругости и пористость.

В настоящее время открытую пористость определяют по влагонасыщению в соответствии с российскими и зарубежными стандартами. Наиболее широко используемым методом измерения полной пористости, включающим измерение как открытой, так и закрытой пористости, является рентгеновская томография [5–9].

Для комплексной оценки состояния и внутренней структуры геоматериалов эффективно дополнить данный метод ультразвуковой диагностикой. Однако стандартные ультразвуковые дефектоскопы и томографы, как правило, работают на определенной резонансной частоте [10, 11], что затрудняет определение геометрических размеров разномасштабных дефектов и их расположение. Переход к возбуждению и приему широкополосных ультразвуковых сигналов с помощью пьезопреобразователей приводит к резкому уменьшению излучаемой мощности и существенному снижению чувствительности, и, следовательно, к сужению динамического диапазона. Поэтому представляется перспектив-

ным использование лазерно-ультразвуковой структуроскопии [12, 13] и томографии [14] для диагностики внутренней структуры, оценки пористости, определения локальных упругих свойств природного камня. Как показано в работах [14–16], основное преимущество данных методов заключается в возможности лазерного возбуждения мощных ультразвуковых импульсов со строго контролируемой формой и регистрации прошедших или отраженных сигналов от неоднородностей сигналов широкополосным пьезоприемником.

В данной работе на основе методов лазерно-ультразвуковой структуроскопии исследованы структура и пористость известняков, а также зависимость модулей упругости от пористости.

Материалы и методы

Эксперименты выполнялись на образцах известняка, для которых был проведен комплекс предварительных испытаний, включающий в первую очередь изготовление аншлифов и проведение минерального и элементного анализов с использованием сканирующего электронного микроскопа «Phenom ProX» (рис. 1), работающего в режиме оптического изображения (для петрографического анализа), и электронного изображения (для определения элементного состава).

Минеральный состав представлен кальцитом, содержание которого колебалось в пределах 97,5–98,3 %, незначительным количеством кварца (1,5–2,3 %) и доломитом (менее 0,5 %). В элементном составе обнаружено незначительное присутствие примесей в виде кремния (0,2–0,3 %), магния (0,1–0,2 %), железа (0,1 %), которые были распределены равномерно по всей поверхности исследуемых аншлифов.

Для измерения локальных скоростей упругих волн, определения по ним пористости и локальных модулей упругости использовался эхо-режим лазерно-ультразвуковой диагностики [15].

Объемная концентрация пор (пористость) образца *P,* усредненная по всему объему образца, определяется как:

$$P = \frac{V_{пор}}{V}, \qquad (1)$$

где $V_{пор}$ — объем пор, V — объем образца. Если m — масса образца, то ее выражение через плотность ρ может быть записано следующим образом:

$$m = \rho V = \rho_0 (V - V_{пор}), \qquad (2)$$

где ρ — измеренная плотность пористого образца, ρ_0 — плотность материала без пор.

Перепишем формулу (2) в виде:

$$\rho = \rho_0 (1 - P). \qquad (3)$$

Известно, что для значений пористости до 20–25 % справедливо соотношение [14]:

$$\frac{V_l}{V_{l0}} = (1 - P^{2/3})^{1/2}, \qquad (4)$$

где V_l — скорость распространения продольной ультразвуковой волны в образце, а V_{l0} — аналогичная скорость в идеальном материале без пор.

Рис. 1. Растровый электронный микроскоп «Phenom ProX»
Fig. 1. Scanning electron microscope «Phenom ProX»

Выразим пористость через скорость (4):

$$P = (1 - (\frac{V_l}{V_{l0}})^2)^{2/3}. \qquad (5)$$

Подставим выражение (5) в (3):

$$\rho = \rho_0 (1 - (1 - (\frac{V_l}{V_{l0}})^2)^{3/2}. \qquad (6)$$

Таким образом, измеряя для нескольких образцов плотность ρ и усредненное по нескольким точкам для каждого образца значение скорости продольных волн V_l, можно найти параметры ρ_0 и V_{l0}.

Верификация найденного значения V_{l0} была проведена следующим образом. Известно, что основные минералы, содержащиеся в известняке (кальцит, кварц и незначительное количество доломита), принадлежат к тригональному классу симметрии [17]. В кристаллах тригональной сингонии только вдоль трех кристаллографических осей [100], [010] и [001] распространяются чисто продольные волны, скорости V_1, V_2, V_3 которых определяются диагональными элементами матрицы жесткости C_{11}, C_{33} [17]:

$$\rho V_1^2 = C_{33}, \qquad (7)$$

$$\rho V_2^2 = \rho V_3^2 = C_{11}, \qquad (8)$$

где ρ — плотность соответствующего минерала.

Во всех остальных направлениях распространяются квазипродольные волны, фазовые скорости которых определяют из уравнения Грина-Кристоффеля [17], а их значения могут существенно отличаться от значений скоростей чистых мод. Условия существования собственных значений фазовых скоростей и собственных векторов с компонентами U_l(l = 1, 2, 3) в квазипродольных и квазипоперечных волнах, распространяющихся в произвольном направлении, определяются с помощью уравнения Грина-Кристоффеля:

$$(\Gamma_{il} - \rho \times V^2 \times \delta_{il}) \times U_l = 0, \qquad (9)$$

где V — фазовая скорость в соответствующем направлении, $\Gamma_{il} (i = 1, 2, \ldots, 6)$ — тензор Кристоффеля, δ_{il} — символ Кронекера.

Система (9) имеет единственное нетривиальное решение, если детерминант, составленный из коэффициентов при U_l, равен нулю:

$$| \Gamma_{il} - \rho \times V^2 \times \delta_{il} | = 0. \qquad (10)$$

Например, для направления [110] тригонального класса симметрии компоненты тензора Кристоффеля имеют вид:

$$\begin{aligned} &\Gamma_{il} = C_{11} + C_{66} && \Gamma_{12} = C_{12} + C_{66} \\ &\Gamma_{22} = C_{66} + C_{11} && \Gamma_{13} = 2C_{14} \\ &\Gamma_{33} = 2C_{44} && \Gamma_{23} = -C_{14} \end{aligned} \qquad (11)$$

Тогда определитель системы уравнений (10) для данного направления [110] с учетом выражений (11) примет вид:

$$\begin{vmatrix} C_{11} + C_{66} - \rho \times V^2 & C_{22} + C_{66} & 2C_{14} \\ C_{12} + C_{66} & C_{66} + C_{11} - \rho \times V^2 & -C_{14} \\ 2C_{14} & -C_{14} & 2C_{14} - \rho \times V^2 \end{vmatrix} = 0 \qquad (12)$$

Данный определитель эквивалентен уравнению третьей степени относительно $\rho \times V^2$, корни которого задают фазовые скорости двух квазипоперечных волн и одной квазипродольной, которой соответствует максимальное значение.

Поскольку в известняке минералы кальцита и кварца хаотически ориентированы, то для вычисления скорости V_{l0} необходимо выполнить усреднение по всем направлениям, что является достаточно трудоемкой процедурой. Поэтому для оценки V_{l0} по известным значениям коэффициентов матрицы жесткости $\{C_{ij}\}, i, j = 1, \ldots, 6$ для кальцита, кварца и доломита, приведенным в табл. 1, были найдены скорости V_1, V_2, V_3 вдоль кристаллографических осей [100], [010], [001] и дополнительно

в направлениях [110], [011] [101] — скорости V_{12}, V_{23}, V_{13} для каждого минерала [17].

Полученные усредненные по шести направлениям скорости квазипродольных волн V_l каждого из трех минералов также приведены в табл. 1.

С учетом содержания кальцита n_1 = = 0,975, кварца n_2 = 0,020 и доломита n_3 = 0,005 было вычислено среднее значение скорости квазипродольных волн в образце известняка без пор:

$$V_{l0} = n_1 V_{l1} + n_2 V_{l2} + n_3 V_{l3}, \qquad (13)$$

где V_{l1}, V_{l2}, V_{l3} — средние значения скоростей в минералах, взятые из табл. 1; n_1, n_2, n_3 — содержание кальцита, кварца и доломита, соответственно.

В результате проведенных расчетов среднее значение скорости составило V_{l0} = 5293 м/с.

Результаты и обсуждение

Один из характерных наблюдаемых акустических треков сигналов, измеренных для образца известняка, приведен на рис. 2. Первый положительный пик, зарегистрированный в момент времени около 4 мкс, распространялся от границы оптико-акустического генератора через призму к широкополосному пленочному пьезпреобразователю и служил опорным импульсом. Второй пик, зарегистрированный через ~4,22 мкс, соответствовал отраженному от границы раздела «генератор-образец» из-за различия акустических импедансов данных сред. Первый отрицательный пик, пришедший в противофазе с опорным сигналом, соответствовал ультразвуковому импульсу, отраженному от донной поверхности образца. Между первым отраженным от свободной поверхности образца сигналом и вторым располагался импульс сдвиговой волны значительно меньшей амплитуды, возникающий за счет граничных условий. Вертикальные линии на рис. 2 являются подвижными маркерами для отметки экстремумом соответствующих сигналов. Измеряя соответствующие временные интервалы при измеренной толщине образца, можно определить локальные скорости продольных и сдвиговых волн с погрешностью менее 0,2 % [15].

Поскольку апертура пьезоприемника составляла 4 мм, то ультразвуковой сигнал «вырезал» из образца элементарный цилиндр, диаметром 4 мм и высотой, равной толщине образца. С учетом толщины и времени двойного пробега акустического импульса по образцу рассчитывались скорости распространения продольных волн V_{li} в каждом i-ом цилиндре (i = 1, 2,..., 100) и выполнялось усреднение по 100 точкам. Средние по каждому образцу значения скоростей продольных V_l и сдвиговых V_t волн, а также измеренные плотности ρ для пяти образцов приведены в табл. 2.

График, построенный по значениям скоростей и плотности, приведен на рис. 3. Из данного графика определены V_{l0} = 5310 м/с и ρ_0 = 2710 кг/м^3.

Таблица 1

Коэффициенты матрицы жесткости и скорости для кальцита, кварца, доломита
Coefficients of the stiffness and velocity matrix for calcite, quartz, dolomite

Порода	C_{11}, ГПа	C_{12}, ГПа	C_{44}, ГПа	C_{33}, ГПа	C_{13}, ГПа	C_{66}, ГПа	ρ,кг/м^3	V_l, м/с
Кальцит	137	45,2	34,2	79,2	44,8	45,9	2710	5290
Кварц	86,8	7,1	58,3	105,9	–11,9	39,9	2650	5720
Доломит	113	39,8	71	57,4	–19,5	67	2850	4980

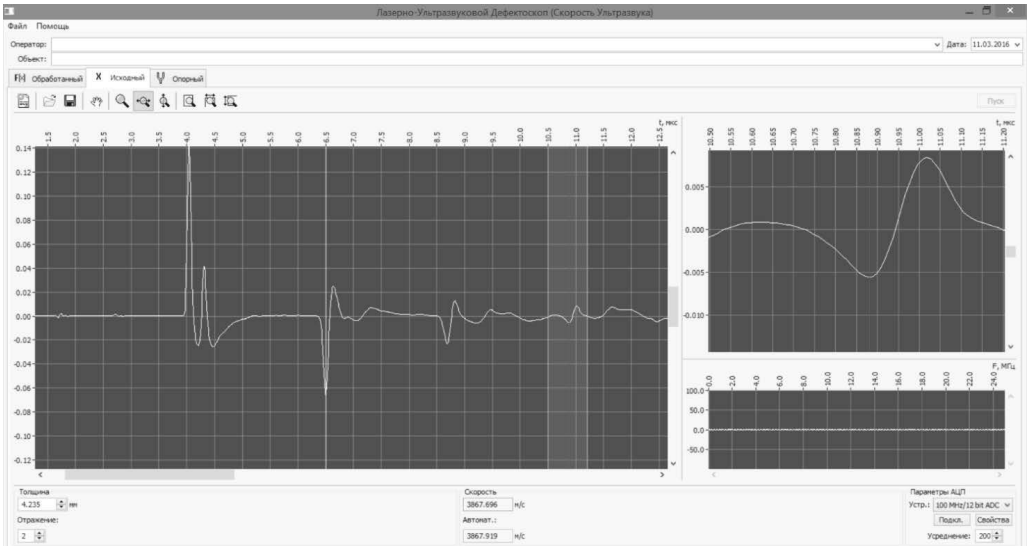

Рис. 2. Рабочее окно лазерно-ультразвукового дефектоскопа
Fig. 2. Working window of laser-ultrasonic flaw detector

Таблица 2
Экспериментальные значения плотностей и скоростей упругих волн
Experimental values of densities and velocities of elastic waves

№	ρ, кг/м^3	V_l, м/с	V_t, м/с
1	2334	4433	2390
2	2360	4540	2420
3	2471	4758	2531
4	2199	4289	2043
5	2439	4696	2508

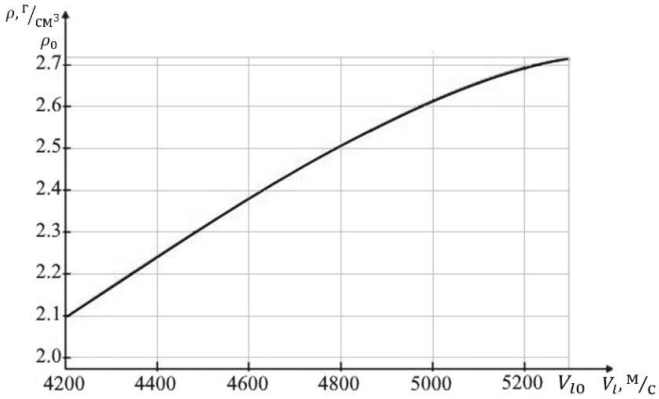

Рис. 3. График зависимости плотности известняка от скорости продольных волн
Fig. 3. Graph of the dependence of the density of limestone on the speed of longitudinal waves

Таблица 3
Пористость и модули упругости образцов известняка
Porosity and elastic moduli of limestone samples

№	*P*, %	*E*, ГПа	*G*, ГПа	ν
1	13,8	34,5	13,3	0,31
2	12,9	36,0	13,8	0,30
3	8,8	41,4	15,9	0,30
4	18,9	24,8	9,2	0,34
5	10,1	39,1	15,3	0,27

С использованием формулы (3) и полученной плотности ρ_0 была рассчитана объемная пористость каждого из образцов, значения которой приведены в табл. 3. По измеренным скоростям упругих волн и плотности рассчитаны модуль Юнга *E*, модуль сдвига *G* и коэффициент Пуассона ν:

$$E = \rho V_t^2 (3 - \frac{1}{x-1}),\ G = E = \rho V_t^2,$$
$$\nu = \frac{x-2}{2(x-1)}, \qquad (11)$$

где $x = (V_l / V_t)^2$.

Приведенные в табл. 3 значения физико-механических характеристик показывают квазилинейную зависимость модулей Юнга и сдвига от пористости. Эти величины прямо пропорционально уменьшаются при возрастании пористости. При этом для коэффициента Пуассона не обнаружено его взаимосвязи с пористостью.

Заключение

В работе проведены исследования минерального и элементного составов образцов известняка. Показано, что в образцах присутствуют в среднем 97,5 % кальцита, 2 % кварца, 0,5 % доломита, содержание остальных минералов менее 0,1 %. Для известняка данного состава:

1) получены аналитические выражения, позволяющие связать измеренные плотность образца и скорость продольных волн со значениями плотности известняка и скорости продольных волн образца без пор того же минерального состава;

2) по данной функциональной зависимости определены плотность и скорость продольных волн в известняке без пор; данные значения верифицированы на основе аналитического расчета с использованием уравнения Грина-Кристоффеля, выполненного для среды, состоящей из хаотически ориентированных кристаллов кальцита, кварца, доломита, которые относятся к тригональному классу симметрии;

3) найдена общая пористость (для каждого образца), включающая закрытую и открытую;

4) выполнены прецизионные измерения скоростей продольных и сдвиговых волн с погрешностью менее 0,2 % на основе лазерно-ультразвуковой структуроскопии;

5) по измеренным скоростям рассчитаны динамические модули упругости; установлено, что модули Юнга и сдвига квазилинейно зависят от пористости, а для коэффициента Пуассона не прослеживается четкой связи с пористостью.

Таким образом, комплекс методов, состоящий из минерального анализа образцов и лазерно-ультразвуковой диагностики, позволяет определять корреляционные связи динамических модулей упругости и общей пористости для гетерогенных сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Marinoni N.*, Pavese Al., *Bugini R.*, *Silvestro G. Di*. Black limestone used in Lombard architecture // Journal of Cultural Heritage, 2002. Vol. 3, Issue 4, pp. 241—249. DOI: 10.1016/S1296—2074(02)01233—5.

2. La *Russa M. F.*, *Belfiore C. M.*, *Fichera G. V.*, *Maniscalco R.*, *Calabro C.*, *Ruffolo S. A.*, *Pezzino A*. The behaviour to weathering of the Hyblean limestone in the Baroque architecture of the Val di Noto (SE Sicily): An experimental study on the «calcare a lumachella» stone // Construction and Building Materials, 2015. Vol. 77, pp. 7—19. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.073.

3. *Dreyfuss T.* Artificially induced calcium oxalate on limestone in urban environments — New findings // Journal of Cultural Heritage, 2020. Vol. 42, pp. 56—63. DOI: 10.1016/j.culher.2019.06.011.

4. *Gaylarde Chr.* C, *Gaylarde P. M.*, *Beech Iw. B*. Deterioration of limestone structures associated with copper staining // International Biodeterioration & Biodegradation, 2008. Vol. 62. Issue 2, pp. 179—185.

5. *Вайсберг Л. А.*, *Каменева Е. Е.* Исследование изменения структуры пористости горных пород на разных этапах нагружения // Обогащение руд. — 2019. — № 3. — С. 37—42.

6. *Якушина О. А.*, *Ожогина Е. Г.*, *Хозяинов М. С.* Микротомография техногенного минерального сырья // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. — 2015. — № 11. — С. 38–43.

7. *Вайсберг Л. А.*, *Каменева Е. Е.*, *Пименов Ю. Г.*, *Соколов Д. В.* Исследование структуры порового пространства гнейсо-гранита методом рентгеновской компьютерной микротомографии // Обогащение руд. — 2013. — № 3. — С. 37–40.

8. *Martinez-Martinez J.*, *Fusi N.*, *Galiana-Merino J. J.*, *Benavente D.*, *Crosta G. B.* Ultrasonic and X-ray computed tomography characterization of progressive fracture damage in low-porous carbonate rocks // Engineering Geology, 2016, Vol. 200, pp. 47—57.

9. *Kravcov A.*, *Svoboda P.*, *Konvalinka A.*, *Cherepetskaya E. B.*, *Sas I. E.*, *Morozov N. A.*, *Zatloukal J.* Evaluation of crack formation in concrete and basalt specimens under cyclic uniaxial load using acoustic emission and computed X-Ray Tomography // Key Engineering Materials, 2017, Vol. 722, pp. 247—253.

10. *Chawre B.* Correlations between ultrasonic pulse wave velocities and rock properties of quartz-mica schist // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, Vol. 10, Issue 3, pp. 594—602, DOI:10.1016/j.jrmge.2018f.01.006.

11. *Gheibi A.*, *Hedayat A.* Ultrasonic imaging of microscale processes in quartz gouge during compression and shearing // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, Vol. 12, Issue 6, pp. 1137—1151, DOI:10.1016/j.jrmge.2020.03.011.

12. *Scales J. A.*, *Malcolm A. E.* Laser characterization of ultrasonic wave propagation in random media // Physical Review E, 2003, Vol. 67, pp. 67—73, DOI: 10.1103/PhysRevE.67.046618.

13. *Карабутов А. А.*, *Подымова Н. Б.*, *Черепецкая Е. Б.* Определение одноосных напряжений в стальных конструкциях лазерно-ультразвуковым методом // Прикладная механика и техническая физика. — 2017. — № 3. — С. 146—155. DOI: 10.15372/PMTF20170315.

14. *Shibaev I. A.*, *Cherepetskaya E. B.*, *Bychkov A. S.*, *Zarubin V. P.*, *Ivanov P. N.* Evaluation of the internal structure of dolerite specimens using X-ray and laser ultrasonic tomography // International Journal of Civil Engineering and Technology, 2018. Vol. 9, Issue 9, pp. 84—92.

15. *Shibaev I. A.*, *Morozov D. V.*, *Dudchenko O. L.*, *Pavlov I. A.* Estimation of local elastic moduli of carbon-containing materials by laser ultrasound // Key Engineering Materials, 2018. Vol. 769, pp. 96—10. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.769.96.

16. *Grigoriev K. S.*, *Kuznetsov N.* Yu., *Cherepetskaya E. B.*, *Makarov V. A.* Second harmonic generation in isotropic chiral medium with nonlocality of nonlinear optical response by heterogeneously polarized pulsed beams // Optics Express, 2017, Vol 25, Issue 6, pp. 6253—6262. DOI: 10.1364/OE.25.006253.

17. *Александров К.* С, *Продайвода Г. Т.* Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. — СО РАН, 2000. — 349 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Marinoni N., Pavese Al., Bugini R., Silvestro G. Di. Black limestone used in Lombard architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 2002. Vol. 3, Issue 4, pp. 241—249. DOI: 10.1016/S1296—2074(02)01233—5.

2. La Russa M. F., Belfiore C. M., Fichera G. V., Maniscalco R., Calabro C., Ruffolo S. A., Pezzino A. The behaviour to weathering of the Hyblean limestone in the Baroque architecture of the Val di noto (SE Sicily): An experimental study on the «calcare a lumachella» stone. *Construction and Building Materials*, 2015. Vol. 77, pp. 7—19. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.073.

3. Dreyfuss T. Artificially induced calcium oxalate on limestone in urban environments — New findings. *Journal of Cultural Heritage*, 2020. Vol. 42, pp. 56—63. DOI: 10.1016/j.culher.2019.06.011.

4. Gaylarde Chr. C, Gaylarde P. M., Beech Iw. B. Deterioration of limestone structures associated with copper staining. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2008. Vol. 62. Issue 2, pp. 179—185.

5. Vaisberg L. A., Kameneva E. E. Investigation of changes in the structure of porosity of rocks at different stages of loading. *Ore and Metals*. 2019, no. 3, pp. 37—42. [In Russ].

6. Yakushina O. A., Ozhogina E. G., Khozyainov M. S. Microtomography of technogenic mineral raw materials. *Vestnik*. 2015, no. 11, pp. 38–43. [In Russ].

7. Vaisberg L. A., Kameneva E. E., Pimenov Yu. G., Sokolov D. V. Study of the structure of the pore space of gneissic-granite by X-ray computer microtomography. *Ore and Metals*. 2013, no. 3, pp. 37—40. [In Russ].

8. Martinez-Martinez J., Fusi N., Galiana-Merino J. J., Benavente D., Crosta G. B. Ultrasonic and X-ray computed tomography characterization of progressive fracture damage in low-porous carbonate rocks. *Engineering Geology*, 2016, Vol. 200, pp. 47—57.

9. Kravcov A., Svoboda P., Konvalinka A., Cherepetskaya E. B., Sas I. E., Morozov N. A., Zatloukal J. Evaluation of crack formation in concrete and basalt specimens under cyclic uniaxial load using acoustic emission and computed X-Ray Tomography. Key Engineering Materials, 2017, Vol. 722, pp. 247—253.

10. Chawre B. Correlations between ultrasonic pulse wave velocities and rock properties of quartz-mica schist. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, Vol.10, Issue 3, pp. 594—602. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.01.006.

11. Gheibi A., Hedayat A. Ultrasonic imaging of microscale processes in quartz gouge during compression and shearing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, Vol. 12, Issue 6, pp. 1137—1151. DOI:10.1016/j.jrmge.2020.03.011.

12. Scales J. A., Malcolm A. E. Laser characterization of ultrasonic wave propagation in random media. *Physical Review E*, 2003, Vol. 67, pp. 67—73. DOI: 10.1103/PhysRevE.67.046618.

13. Karabutov A. A., Podymova N. B., Cherepetskaya E. B. Determination of uniaxial stresses in steel structures by laser-ultrasonic method. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017, no. 3, pp. 146—155. DOI: 10.15372/PMTF20170315 [In Russ].

14. Shibaev I. A., Cherepetskaya E. B., Bychkov A. S., Zarubin V. P., Ivanov P. N. Evaluation of the internal structure of dolerite specimens using X-ray and laser

ultrasonic tomography. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2018, Vol. 9, Issue 9, pp. 84—92.

15. Shibaev I. A., Morozov D. V., Dudchenko O. L., Pavlov I. A. Estimation of local elastic moduli of carbon-containing materials by laser ultrasound. *Key Engineering Materials,* 2018, Vol. 769, pp. 96—101. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.769.96.

16. Grigoriev K. S., Kuznetsov N. Yu., Cherepetskaya E. B., Makarov V. A. Second harmonic generation in isotropic chiral medium with nonlocality of nonlinear optical response by heterogeneously polarized pulsed beams. *Optics Express*, 2017, Vol 25, Issue 6, pp. 6253—6262. DOI: 10.1364/OE.25.006253

17. Aleksandrov K. S, Prodajvoda G. T. *Anizotropiya uprugih svojstv mineralov i gornyh porod* [Anisotropy of elastic properties of minerals and rocks], Krasnoyarsk, SB RAS, 200, 349 p. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галунин Андрей Алексеевич[1] — аспирант, galunin.andrew@yandex.ru;
Гапеев Артем Андреевич[1] — инженер;
Вацлав Поспичал[2] — PhD;
[1] Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС» Горный институт, Москва, Россия;
[2] Чешский технический университет в Праге, Чешская Республика.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galunin A. A.[1], Graduate student, galunin.andrew@yandex.ru;
Gapeev A. A.[1], engineer;
Václav Pospíchal[2], Ph.D;
[1] National Research Technological University «MISiS» Mining Institute, Moscow, Russia.
[2] Czech Technical University in Prague, Czech Republic.

Получена редакцией 20.01.2021; получена после рецензии 26.02.2021; принята к печати 10.03.2021.
Received by the editors 20.01.2021; received after the review 26.02.2021; accepted for printing 10.03.2021.