ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(4-1):138–147
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.023.25:539.32+620.179.16 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_138

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

И. А. Шибаев

Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»
Горный институт, Москва, Россия

Аннотация: Основным упругим параметром геомеханических моделей является модуль упругости. При ограниченном количестве геологического материала в виде исходного керна приходится находить динамические модули упругости для дальнейшего определения статических модулей по известным моделям. Существующие ультразвуковые методы с пьезовозбуждением и пьезоприемом не обладают высокой точностью измерения скоростей. Для решения данной проблемы предлагается использовать лазерную ультразвуковую диагностику. В работе исследовались полноразмерные образцы горных пород различного генотипа — гранит и известняк. Динамические модули упругости полноразмерных образцов каждой из пород рассчитывались по скоростям упругих волн в них, определенным с помощью лазерной ультразвуковой установки Геоскан-02МУ в режиме проходящих волн. А для образцов-пластин, которые подготавливались из полноразмерных образцов, модули были определены с помощью установки УДЛ-2М в эхо-режиме. Далее динамические упругие модули полноразмерных образцов и подготовленных из них образцов-пластин сравнивались. С помощью проведенного корреляционно-регрессионного анализа была выявлена тесная связь между полученными значениями. Было установлено, что для оценки динамического модуля упругости горной породы достаточно использовать образец-пластину, подготовленную из ненарушенного керна. Также был разработан алгоритм предварительной оценки динамического модуля упругости на образцах-пластинах горных пород.

Ключевые слова: упругие волны, скорость распространения, лазерный источник ультразвука, динамический модуль упругости, известняк, гранит, полноразмерный образец, ограниченное количество геологического материала.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90063.

Для цитирования: *Автор* Определение динамических модулей упругости образцов горных пород при использовании различных методов лазерной ультразвуковой диагностики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4-1. — С. 138–147. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_138.

Determination of the dynamic elastic modulus of rock samples using various methods of laser ultrasound diagnostics

I. A. Shibaev

National Research Technological University “MISiS” Mining Institute 119049, Moscow, Russia

© И. А. Шибаев. 2021

Abstract: The main elastic parameter of geomechanical models is the modulus of elasticity. When there is no sufficient amount of geological material (rock core), dynamic elastic moduli are determined using known models; the static moduli are evaluated using dynamic ones. Existing ultrasonic techniques that involve generating and recording ultrasound with piezoelectric components are unable to measure velocities with high accuracy. To address this problem, it is proposed to use laser ultrasonic diagnostics. In this work, we examined full-size rock samples of different genotypes: granite and limestone. The dynamic elastic moduli of full-size granite and limestone specimens are determined from elastic wave velocities measured with a Geoscan-02MU laser ultrasonic detector operating in a through-transmission mode. The moduli of thin plate-like specimens prepared from full-size granite and limestone samples were determined using a UDL-2M detector operating in a pulse-echo mode. The dynamic elastic moduli of full-size specimens and plate-like specimens were compared. Correlation and regression analysis shows that there is a close relationship between the dynamic elastic moduli of full-size specimens and plate-like specimens. It is found that the dynamic modulus of elasticity of rocks can be evaluated using a thin plate-like specimens prepared from undisturbed core. Also, an algorithm is developed for the preliminary assessment of the dynamic modulus of elasticity of rocks using thin plate-like specimens.

Key words: Elastic waves, propagation velocity, laser ultrasound source, dynamic modulus of elasticity, limestone, granite, full-size sample, limited geological information.

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR, project number 19-35-90063.

For citation: Shibaev I. A. Determination of the dynamic elastic modulus of rock samples using various methods of laser ultrasound diagnostics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4-1):138–147. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_138.

Введение

Модуль упругости является важным физико-механическим свойством горных пород. Данный параметр определяет деформируемость пород при приложенных к ним нагрузках. Обычно производят отбор керна и доставляют отобранный материал в испытательные лаборатории для определения модуля упругости с помощью разрушающих испытаний. Такой метод называют статическим [1]. Разрушающий характер этих испытаний означает, что он не подходит для использования в определенных ситуациях, например, при обследовании исторических зданий. Также возникает сложность в определении модуля упругости, когда при геологической разведке месторождения полезных ископаемых не удалось отобрать полноценный, ненарушенный керн [2]. В условиях ограниченного количества исходного геологического материала в рамках изучения его физико-механических свойств возникает необходимость как их неразрушающего способа исследования [3–6], так и повышения точности измерения основных характеристик.

Существует метод, с помощью которого по измеренным скоростям продольных и сдвиговых акустических волн рассчитывают динамический модуль упругости [7]. Хотя существуют физические причины различия статических и динамических модулей [8], часто этот метод является единственным способом определения упругих характеристик.

В основном для определения скоростей упругих волн используют резонансные пьезопреобразователи [9–11], и данная реализация дает значительную погрешность.

В настоящее время активно развивается метод лазерной ультразвуковой диагностики, который имеет существенное преимущество, заклю-

чающееся в возбуждении мощных коротких ультразвуковых импульсов, используя которые можно прецизионно измерять скорости упругих волн в образце [12, 13]. Данный метод реализован в нескольких режимах работы соответствующих установок [14, 15]. Первый — режим эхо-импульсов, при котором волна генерируется и регистрируется на одной и той же стороне образца, что требует одностороннего доступа к объекту исследования. Второй — иммерсионный теневой режим, при котором образец помещается между генератором и приемником в кювете с водой.

В настоящей работе приведены экспериментальные результаты определения упругих скоростей образцов горных пород разного генотипа, расчёт динамических модулей упругости на образцах разной формы, как стандартной (в соответствии с [10]), так и образцов-пластин соответствующей выборки, толщиной не более 1 см.

Материалы и методы

Образцы горных пород

Были исследованы образцы горных пород двух различных генотипов: магматического (гранит) и осадочного (известняк). Исследуемые образцы гранита были отобраны из Воронежской глубокой скважины, образцы известняка были получены при геологической разведке месторождения Бранко Валонго (Португалия). Визуально отбирались ненарушенные образцы (без видимых поверхностных трещин или явных минералогических разностей). Далее подготавливалось по 10 образцов известняка и гранита призматической формы с размерами 40×40×80 мм со строгим требованием параллельности граней. Для каждого из подготовленных образцов рассчитаны плотности .

Был выполнен минералогический анализ образцов.

Гранит был равномерно зернистый, полнокристаллический, с преобладанием плагиоклаза (30 %), щелочного полевого шпата (35 %), кварца (20 %), биотита (10 %) и роговой обманки с примесью хлорита, титанита и циркона. Эта порода характеризуется низкой открытой пористостью и незначительным числом межкристаллических трещин.

Известняк имел низкую пористость, в основном межкристаллитную. Его преобладающим минералом был кальцит с низким содержанием доломита. Кроме того, наблюдались небольшие количества кварца, а также пирита (мелкие кристаллы и агрегаты), микрокристаллического кремнезема и флюорита.

Измерение скоростей упругих волн с помощью лазерного источника ультразвука теневым методом и в эхо-режиме

Значения скоростей упругих волн, распространяющихся в вышеперечисленных образцах, определяли с помощью лазерной ультразвуковой диагностики, которая была реализована двумя способами работы: иммерсионный способ работы в режиме проходящих волн и контактный эхо-режим [16, 17].

На первом этапе для измерения скорости двух упругих волн продольной *P* и сдвиговой *S* и дальнейшего расчёта динамических модулей упругости использовалась установка Геоскан-02МУ, работающая в режиме проходящих волн (рис. 1). Оптико-акустический генератор, пьезоприемник и образец помещались в кювету с иммерсионной жидкостью. Для поворота образца относительно направления падения акустического пучка продольной волны был установлен шаговый двигатель

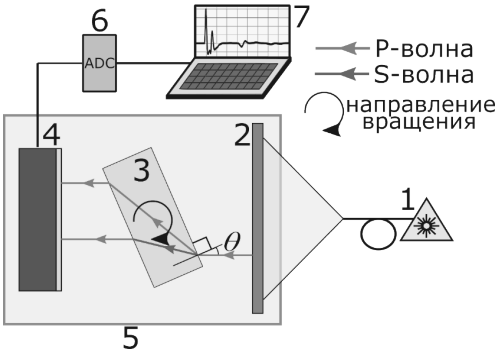


Рис. 1. Принципиальная схема установки Геоскан-02МУ: 1 — лазерный источник Nd:Yag; *2* — генератор; *3* — образец, закрепленный в зажимном устройстве поворотной оси; *4* — пьезоприемник; *5* — кювета с дистиллированной водой; *6* — аналого-цифровой преобразователь; *7* — компьютер для обработки данных
Fig. 1. Schematic diagram of the Geoscan-02MU installation: 1 — Nd:Yag laser source; *2* — generator; *3* — sample fixed in the clamping device of the rotary axis; *4* — piezoreceiver; *5* — distilled water tank; *6* — analog-to-digital converter; *7* — personal computer

на поворотную ось зажимного устройства и написана программа для микроконтроллера, управляющего двигателем поворотной оси. Данная установка была автоматизирована.

Поворот образца приводил к определенному углу падения θ относительно нормали к его поверхности и генерации прошедших в образец продольной и сдвиговых волн. При преломлении на границе раздела «образец — жидкость» сдвиговая волна трансформируется в продольную, которая принимается пьезоприемником.

На установке (рис. 1) могут исследоваться образцы с ограничениями по геометрическим параметрам (длина — до 80 мм, ширина и толщина — до 42 мм), строго обусловленными конструктивом основных узлов.

Для определения скоростей упругих волн в режиме проходящих волн изначально измерялись времена прихода $T(\theta)$ импульсов данных волн при различных углах падения θ из жидкости в образец, для которых было получено следующее аналитическое выражение:

$$T(\theta) = T_w + \frac{h_s}{v_w}\left(\left[\frac{v_w^2}{v^2} - \sin^2\theta\right]^{1/2} - \cos\theta\right), \quad (1)$$

где T_w — время распространения акустического импульса волны в иммерсионной жидкости без образца, v_w — скорость продольных волн в иммерсионной жидкости, v — скорость распространения волны в образце (*P* или *S*), θ — угол, под которым продольная акустическая волна падает из иммерсионной жидкости на образец.

Далее по определенным временам распространения рассчитывались скорости каждого типа волн для разных углов падения θ. В расчёте динамического модуля упругости использовалось среднее значение скоростей продольных V_p и сдвиговых V_s, а также плотность ρ каждого образца. Расчёт модулей производился по формулам:

$$E_{dyn} = \rho \cdot V_p^2 \cdot \left[3 - \frac{1}{\chi - 1}\right], \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\chi - 2}{2(\chi - 1)}, \quad (3)$$

где $\chi = (V_p / V_s)^2$ — квадрат отношения значений скоростей продольной волны V_p к сдвиговой V_s, E_{dyn} — модуль упругости, μ — коэффициент Пуассона.

Таким образом, с помощью установки Геоскан-02МУ определялись динамические модули упругости для полноразмерных образцов горных пород по стандартам ASTM 2845 и ГОСТ 21153—75.

Далее каждый из ранее подготовленных образцов нарезались с помощью отрезного станка Struers на плоскопараллельные пластины размером

40×40×10 мм с целью определения значения скоростей волн для определенного количества точек в каждой пластине.

Скорости и получаемые волновые формы акустических импульсов определялись с помощью лазерного ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М в эхо-режиме при сканировании по поверхности пластины [13].

Сравнивались результаты рассчитанных динамических модулей упругости каждого образца разного генотипа, определенного с помощью теневого режима лазерной ультразвуковой диагностики со средним значением модулей, определенных с помощью режима эхо-импульсов в пластинках, на которые был распилен соответствующий образец. Была построена корреляционно-регрессионная модель.

Результаты и обсуждение

Значения характеристик образцов, полученных с помощью Геоскан-02МУ представлены в табл. 1, где приведены некоторые параметры статистической обработки: среднее значение каждого параметра, стандартное отклонение δ по $N = 10$ испытаниям образцов одного генотипа.

Далее подготовленные пластины каждого образца обоих генотипов исследовалась с помощью лазерной ультразвуковой установки УДЛ-2М. На рис. 2 представлена схема подготовки образцов и алгоритма исследования. В табл. 2 приведены средние значения плотностей образцов-пластин и упругих характеристик, определённых более чем в 10 точках сканирования по площади образца.

Таблица 1

Свойства исследуемых образцов с помощью теневого режима лазерной ультразвуковой диагностики

Properties of studied samples using transmission-mode immersion laser-ultrasonic diagnostics

	Образцы гранита						Образцы известняка					
№	ρ	*P*	V_p	V_s	$\mu_{dyn}^{full\ size}$	$E_{dyn}^{full\ size}$	ρ	*P*	V_p	V_s	$\mu_{dyn}^{full\ size}$	$E_{dyn}^{full\ size}$
Ед. изм	кг/м³	%	м/с	м/с	–	ГПа	кг/м³	%	м/с	м/с	–	ГПа
1	2 558	1,63	5 253	3 094	0,23	60,5	1 956	1,63	4 344	2 625	0,21	32,7
2	2 559	1,48	5 462	3 169	0,25	64,0	1 944	1,48	4 168	2 428	0,24	28,5
3	2 561	1,13	5 523	3 106	0,27	62,7	1 925	1,13	4 131	2 467	0,22	28,6
4	2 555	0,95	5 489	3 210	0,24	65,3	1 966	0,95	4 125	2 478	0,22	29,4
5	2 561	1,69	5 560	3 289	0,23	68,2	1 946	1,40	4 078	2 374	0,24	27,3
6	2 561	1,52	5 699	3 254	0,26	68,2	1 952	1,52	4 121	2 475	0,22	29,1
7	2 554	1,47	5 627	3 199	0,26	65,9	1 962	1,47	4 149	2 464	0,23	29,2
8	2 558	0,90	5 603	3 299	0,23	68,7	1 968	0,90	4 159	2 446	0,24	29,1
9	2 562	1,75	5 840	3 350	0,25	72,1	1 968	1,75	4 176	2 441	0,24	29,1
10	2 556	3,80	5 980	3 400	0,26	74,5	1 927	1,44	4 147	2 450	0,23	28,5
средне-	2 558	1,63	5 603	3 237	0,25	67,0	1 951	1,37	4 159	2 464	0,23	29,1
δ	2,9	0,82	203	100	0,01	4,2	16,01	0,28	70	64	0,01	1,4

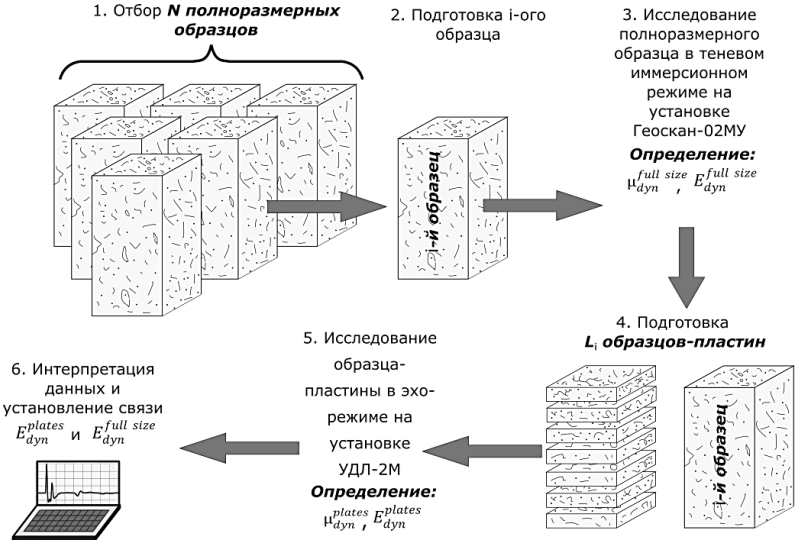
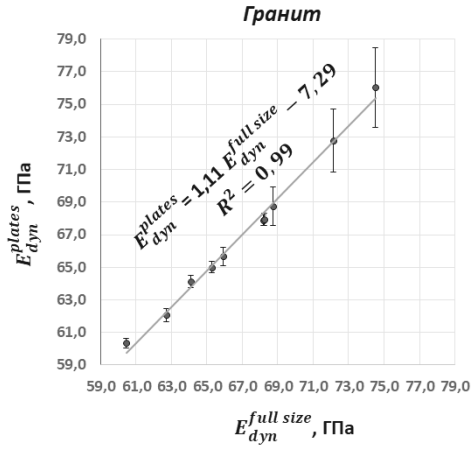


Рис. 2. Общий алгоритм исследования (4 шаг — подготовка образцов-пластин)
Fig. 2. General algorithm of study (fourth step is preparation of samples-plates)

Таблица 2
Плотности и средние значения упругих свойств по точкам сканирования образцов-пластин исследуемых образцов в режиме эхо-импульсов
Densities and average values of elastic properties by scanning points of the surface of samples-plates using echo-mode laser-ultrasonic diagnostics

	Образцы-пластинки гранита					Образцы-пластинки известняка				
№	ρ	V_p	V_s	$\mu_{dyn}^{full\ size}$	$E_{dyn}^{full\ size}$	ρ	V_p	V_s	$\mu_{dyn}^{full\ size}$	$E_{dyn}^{full\ size}$
Ед. изм	кг/м³	м/с	м/с	–	ГПа	кг/м³	м/с	м/с	–	ГПа
1	2 558	5 253	3 090	0,24	60,3	1 956	4 336	2 626	0,21	32,6
2	2 559	5 468	3 170	0,25	64,1	1 943	4 152	2 422	0,24	28,3
3	2 559	5 517	3 088	0,27	62,0	1 924	4 145	2 460	0,23	28,6
4	2 556	5 490	3 198	0,24	65,0	1 965	4 122	2 459	0,22	29,0
5	2 561	5 551	3 280	0,23	67,9	1 944	4 077	2 365	0,25	27,1
6	2 560	5 706	3 244	0,26	67,9	1 952	4 145	2 457	0,23	28,9
7	2 553	5 651	3 186	0,27	65,7	1 962	4 150	2 439	0,24	28,8
8	2 557	5 609	3 299	0,24	68,8	1 967	4 139	2 463	0,23	29,2
9	2 562	5 858	3 367	0,25	72,8	1 967	4 183	2 443	0,24	29,1
10	2 556	6 053	3 434	0,26	76,0	1 925	4 133	2 438	0,23	28,2
сред-нее	2 559,5	5 615	3 236	0,25	67,0	1 950	4 158	2 457	0,23	29,0
δ	2,9	222	113	0,01	4,7	16,1	68,0	66,0	0,01	1,4

Легко видеть, что разница значений модулей, которые были определены с помощью теневого режима проходящих волн на полноразмерном образце, и тех, что определялись как среднее значение по большому числу точек



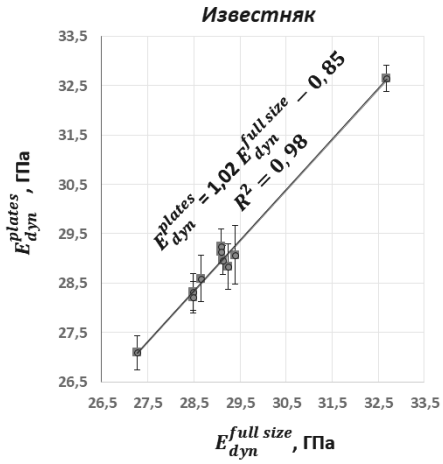


Рис. 3. Связь динамических модулей упругости образцов гранита и известняка, определенных в режимах проходящих и отраженных волн
Fig. 3. Relationship between the dynamic elastic moduli of granite and limestone samples, determined in the modes of transmitted and reflected waves

каждой из 8 пластин в эхо-режиме, не превосходит 2,0 %. Так, например, для гранитов она составила, в среднем, 0,4 ГПа, а для известняков всего 0,2 ГПа. Обусловлены данные расхождения незначительными структурными различиями, выявленными при подготовке пластин из полноценных образцов, что было отражено в расхождении значений плотности.

Полученные данные были обработаны статистически на основе корреляционно-регрессионного анализа (КРА) для построения аппроксимирующей кривой. На рис. 3 приведены найденные зависимости между установленными значениями динамических модулей упругости, определенными с помощью разных режимов и на разных «масштабных» уровнях образцов.

Сравнительная характеристика показателей модулей упругости образцов гранита и известняка, полученных с помощью разных режимов, показала достаточно тесную корреляционную связь между ними.

Полученные уравнения регрессии упругих модулей несущественно различаются и имеют линейный характер. Можно считать, что $E_{dyn}^{full\ size} \approx E_{dyn}^{plates}$.

Основными открытыми вопросами для дальнейшего изучения остаются определение минимальной толщины образцов-пластин, которые будут нести корректную информацию о динамических модулях упругости, зависимость динамических модулей упругости от частоты скоростей упругих волн (это может помочь повысить качество интерпретации геофизических исследований скважин).

Выводы, заключение

В данной работе:

1. было установлено, что для оценки динамического модуля упругости горной породы в условиях ограниченного количество исходного геологического материала (керна) достаточно отобрать ненарушенные структурно образцы, из которых можно получить образцы толщиной порядка 5 мм и площадью поперечного сечения от 1 см^2;

2. представлен общий алгоритм проведения экспериментов и доказано, что для предварительной оценки дина-

мического модуля упругости достаточно использовать образцы-пластины, которые подготавливаются из полноразмерных образцов (кернов);

3. было выявлено, что динамический модуль упругости горных пород может быть рассчитан на основе скоростей продольных и сдвиговых волн, полученных в результате усреднения их локальных значений, измеренных не менее чем в 10 точках по площади образца предиктора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Осипов Ю. В.*, *Кошелев А. Е.* Современные способы определения деформационных свойств горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 11. — С. 68—75. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-68-75.
2. *Eissa E. A.*, *Kazi A.* Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1988, Vol. 25, Issue 6, pp. 479—482.
3. *Wellington S. L.*, *Vinegar H. J.* X-ray computerized tomography // Journal of Petroleum Technology, № 39, pp. 885–898, 1987. DOI: http://dx.doi.org/10.2118/16983-PA.
4. *Ketcham R. A.*, *Carlson W. D.* Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences // Computers & Geosciences, Issue 27, pp. 381—400, 2001. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0098—3004(00)00116—3.
5. *Koopialipoor M.*, *Noorbakhsh A.*, *Ghaleini A. N.*, *Armaghani D. J.*, *Yagiz S.* A new approach for estimation of rock brittleness based on non-destructive tests // Nondestructive Testing and Evaluation, 2019. Vol. 34, Issue 4, pp. 354—375, DOI: 10.1080/10589759.2019.1623214.
6. *Шибаев И. А.*, *Винников В. А.*, *Степанов Г. Д.* Определение упругих свойств осадочных горных пород на примере образцов известняка с помощью лазерной ультразвуковой диагностики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 7. — С. 125–134. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134.
7. *Машинский Э. И.* Физические причины различия статических и динамических модулей упругости горных пород // Геология и геофизика. — 2003. — Т. 44. — № 9. — С. 953—959.
8. *Auld B. A.* Acoustic Fields and Waves in Solids. Volume 1. California: Krieger Publishing Company, 1990. 446 p.
9. ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. — 8 с.
10. ASTM 2845—08. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, 2017, 7 p.
11. *In'kov V. N.*, *Cherepetskaya E. B.*, *Shkuratnik V. L.*, *Karabutov A. A.*, *Makarov V. A.* Ultrasonic echo sounding by thermal optical sources of longitudinal waves // Journal of Mining Science, 2004, Vol. 40, Issue 3, pp. 231—235.
12. *Bychkov A.*, *Simonova V.*, *Zarubin V.*, *Cherepetskaya E.*, *Karabutov A.* The progress in photoacoustic and laser ultrasonic tomographic imaging for biomedicine and industry: A review // Applied Sciences, 2018, Vol. 8, Issue 10, Article 1931. DOI:10.3390/app8101931.
13. *Cherepetskaya E. B.*, *Karabutov A. A.*, *Makarov V. A.*, *Mironova E. A.*, *Shibaev I. A.*, *Vysotin N. G.*, *Morozov D. V.*, Internal structure research of shungite by broadband ultrasonic spectroscopy // Key Engineering Materials, 2017, Vol. 755, 2017, pp. 242—247.
14. *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.

15. *Bychkov A. S.*, *Cherepetskaya E. B.*, *Karabutov A. A.*, *Makarov V. A.* Laser optoacoustic tomography for the study of femtosecond laser filaments in air // Laser Physics Letters, 2016, Vol. 13, No. 8, pp. 085401 — 085405. DOI: 10.1088/1612-2011/13/8/085401.

16. *Кравцов А.*, *Иванов П. Н.*, *Малинникова О. Н.*, *Черепецкая Е. Б.*, *Гапеев А. А.* Исследование микроструктуры углей Печорского бассейна методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 6. — С. 56 — 65. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-56-65.

17. *Фаворская А. В.* Исследование свойств материала пластины лазерным ультразвуком при помощи анализа кратных волн // Компьютерные исследования и моделирование. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 653 — 673 ГИАБ

REFERENCES

1. Osipov Yu. V., Koshelev A. E. Modern methods for determining the deformation properties of rocks. *Mining informational and analytical bulletin*. 2017, no. 11, pp. 68 — 75. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-68-75 [In Russ].

2. Eissa E. A., Kazi A. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1988, Vol. 25, Issue 6, pp. 479 — 482.

3. Wellington S. L., Vinegar H. J. X-ray computerized tomography. *Journal of Petroleum Technology*, 1987, no 39, pp. 885–898. DOI: http://dx.doi.org/10.2118/16983-PA.

4. Ketcham R. A., Carlson W. D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences. *Computers & Geosciences*, 2001, Issue 27, pp. 381 — 400. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0098 — 3004(00)00116 — 3.

5. Koopialipoor M., no.orbakhsh A., Ghaleini E. N., Armaghani D. J., Yagiz S. A new approach for estimation of rock brittleness based on non-destructive tests. *no.ndestructive Testing and Evaluation*, 2019, Vol. 34, Issue 4, pp. 354 — 375. DOI: 10.1080/10589759.2019.1623214.

6. Shibaev I. A., Vinnikov V. A., Stepanov G. D. Determination of the elastic properties of sedimentary rocks on the example of limestone samples using laser ultrasound diagnostics. *Mining informational and analytical bulletin*. 2020, no 7, pp. 125 — 134. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134. [In Russ].

7. Mashinsky E. I. Physical reasons for the difference in the static and dynamic elastic modulus of rocks. *Geology and Geophysics*. 2003, volume 44. no 9, pp. 953 — 959. [In Russ].

8. Auld B. A. Acoustic Fields and Waves in Solids. Volume 1. Krieger Publishing Company California, 1990, 446 p.

9. Porody gornyye. *Metod opredeleniya skorostey uprugikh prodol'nykh i poperechnykh voln,* GOST 21153.7 — 75. [Rocks. Method for determining the propagation velocities of elastic longitudinal and transverse waves, State Standart 21153.7 — 75], Moscow, Standarty, 1981, 7 p. [In Russ].

10. ASTM 2845 — 08. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, 2017, 7 pages.

11. In'kov V. N., Cherepetskaya E. B., Shkuratnik V. L., Karabutov A. A., Makarov V. A. Ultrasonic echo sounding by thermal optical sources of longitudinal waves. *Journal of Mining Science*, 2004, Volume 40, Issue 3, pp. 231 — 235.

12. Bychkov A., Simonova V., Zarubin V., Cherepetskaya E., Karabutov A. The progress in photoacoustic and laser ultrasonic tomographic imaging for biomedicine and industry: A review. *Applied Sciences*, 2018, Volume 8, Issue 10, Article 1931. DOI:10.3390/app8101931.

13. Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A., Makarov V. A., Mironova E. A., Shibaev I. A., Vysotin N. G., Morozov D. V., Internal structure research of shungite by broadband ultrasonic spectroscopy. *Key Engineering Materials*, 2017, Volume 755, pp. 242 — 247

14. 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

15. Bychkov A. S., Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A., Makarov V. A. Laser optoacoustic tomography for the study of femtosecond laser filaments in air. *Laser Physics Letters*, 2016, Vol. 13, no. 8, pp. 085401 – 085405. DOI: 10.1088/1612-2011/13/8/085401

16. Kravtsov A., Ivanov P. N., Malinnikova O. N., Cherepetskaya E. B., Gapeev A. A. Laser–ultrasonic spectroscopy of the Pechora basin coal microstructure. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, Vol. 6, pp. 56 – 65. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-56-65 [In Russ].

17. Favorskaya A. V., Investigation of plate material properties by laser ultrasound using multiple wave analysis. *Computernie issledovaniya i modelirovanie*, 2019, Vol. 11, Issue. 4, pp. 653 – 673 [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шибаев Иван Александрович — аспирант, mrdfyz@mail.ru, Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС» Горный институт, Москва, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Shibaev I. A., PhD-student, mrdfyz@mail.ru, National Research Technological University “MISiS” Mining Institute, Moscow, Russia.

Получена редакцией 01.02.2021; получена после рецензии 25.02.2021; принята к печати 10.03.2021.
Received by the editors 01.02.2021; received after the review 25.02.2021; accepted for printing 10.03.2021.