ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(4-1):108–117
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.023.25+620.179.16 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_108

# ОБОСНОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ СДВИГОВОЙ УПРУГОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО УЛЬТРАЗВУКА В РЕЖИМЕ ЭХО-ИМПУЛЬСОВ В ГЕОМАТЕРИАЛЕ

**И. А. Шибаев[1], А. С. Бычков[1]**

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

***Аннотация:*** Одним из основных параметров геомеханических моделей является статический модуль упругости. Но довольно часто в условиях ограниченного количества геологического материала приходится определять динамические модули упругости по скоростям упругих волн в образцах и далее по известным корреляционным зависимостям определять значения статических. Существующие ультразвуковые методы с пьезовозбуждением и пьезоприемом не обладают высокой точностью измерения скоростей. Для решения данной проблемы предлагается использовать лазерную ультразвуковую диагностику. В данной работе приведено теоретическое обоснование генерации сдвиговой волны на разделе границ двух сред в эхо-режиме лазерного ультразвука на основе теории количественной сейсмологии. На этой основе был разработан аналитический расчёт временной формы сигнала ультразвуковых импульсов в среде образца известняка. Также были проведены экспериментальные исследования с помощью лазерной ультразвуковой установки УДЛ-2М с целью получения временной формы сигнала на образце известняка. Аналитически определенная временная форма сигнала сравнена с экспериментальной временной формой, также были рассчитаны значения скоростей экспериментальным способом и аналитическим. В итоге была разработанная методика определения скоростей упругих волн в образцах горных пород с помощью подбора временной формы сигналов.

***Ключевые слова:*** генерация сдвиговой волны, скорость распространения, временная форма сигнала, амплитудные коэффициенты, количественная сейсмология, лазерная ультразвуковая диагностика, прецизионные измерения, динамический модуль упругости, известняк.

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

***Для цитирования:*** *Шибаев И. А., Бычков А. С.* Обоснование генерации сдвиговой упругой волны с помощью лазерного ультразвука в режиме эхо-импульсов в геоматериале // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4-1. — С. 108–117. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_108.

## Justification of shear wave generation using laser ultrasound in the mode of echo pulses in geomaterial

**I. A. Shibaev[1], A. S. Bychkov[1]**

[1] National Research Technological University "MISiS" Mining Institute, Moscow, Russia

© И. А. Шибаев, А. С. Бычков. 2021

***Abstract:*** One of the main parameters of geomechanical models is the static elastic modulus. However, sometimes there is no sufficient amount of geological material and the dynamic elastic moduli are determined from elastic wave velocities in rock specimens; then the static moduli are determined using available correlation dependences. 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. Based on the theory of quantitative seismology, the paper theoretically substantiates the generation of shear waves at the interface between two media as a result of pulse-echo laser ultrasonic propagation. On this basis, we analytically simulated the temporal shape of ultrasonic pulses travelling in a limestone specimen. Also, experimental studies were carried out using a laser ultrasonic flaw detector UDL-2M to obtain the temporal shape of ultrasonic pulse in the limestone specimen. The analytically determined shape of the ultrasonic pulse was compared with the experimental one; the velocities were determined experimentally and analytically. Consequently, a technique is developed for determining elastic wave velocities in rock specimens by waveform matching.

***Key words:*** Shear wave generation, propagation velocity, time waveform, amplitude coefficients, quantitative seismology, laser ultrasound diagnostics, precision measurements, dynamic modulus of elasticity, limestone.

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

***For citation:*** Shibaev I. A., Bychkov A. S. Justification for generating a shear elastic wave using laser ultrasound in the mode of echo pulses in a geomaterial. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4-1):108–117. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_108.

## Введение

Одной из наиболее важных характеристик физико-механических свойств горных пород является модуль упругости [1]. В большинстве случаев модуль упругости определяют при механических испытаниях с использованием прессов и тензометрических комплексов в результате интерпретации деформационных кривых. Данный параметр качественно описывает поведение горных пород при разработке массивов и использовании их в виде строительных материалов [2–4], зависит от степени выветривания породы, ее структуры (наличие пор, трещин), температуры [5–7].

Важно заметить, что не всегда удается определить модуль упругости статическим методом ввиду ограниченного количества геологического материала в виде исходного керна. Тогда используют динамический метод, в котором по измеренным скоростям продольных и сдвиговых акустических волн рассчитывают так называемый динамический модуль упругости [8]. Несмотря на то, что существуют физические причины различия статических и динамических модулей [9], часто этот метод является единственным способом определения упругих характеристик.

Обычно для определения скоростей акустических волн используют акустические установки, состоящие из генератора, осцилографа, резонансных пьезопреобразователей [10–12]. Данный метод дает значительную погрешность.

Поэтому в последнее время значения скоростей продольных и сдвиговых волн, распространяющихся в образцах горных пород, стали определять с использованием лазерного ультразвука [13–14]. У данного метода есть несколько режимов работы. Один из основных — режим эхо-импульсов, при котором волна генерируется и регистрируется на одной и той же стороне образца, что требует одностороннего доступа к объекту исследова-

ния. Основное преимущество лазерной генерации ультразвука заключается в том, что возбуждаются мощные короткие ультразвуковые импульсы, используя которые можно прецизионно измерять скорости упругих волн в образце [15].

Однако в работах [16, 17] определялись значения скоростей двух типов упругих волн и далее рассчитывались локальные модули упругости, но не обосновывалась теория возбуждения сдвиговых волн и возможности измерения с необходимой точностью скорости сдвиговой волны.

В настоящей работе исследован процесс возбуждения сдвиговой волны за счёт граничных условий, найдены ее временные формы, обоснована возможность прецизионного измерения ее скорости с необходимой для расчёта динамических модулей упругости точностью.

### Методы и теоретическое обоснование

Определения скоростей продольных и сдвиговой волн осуществлялось с помощью лазерного ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М [14].

Для обоснования возбуждения и расчета параметров сдвиговой волны, возникающей при преломлении и отражении продольной волны с ограниченной апертурой в твердых телах, рассмотрим следующую модель, графически представленную на рис. 1.

Пусть среда 1 — это среда лазерно-ультразвукового преобразователя, в которой сформировалась продольная волна с близким к гауссовому распределением амплитуды давления или колебательной скорости частиц по поперечному сечению, а среда 2 — это среда исследуемого образца, ограниченная снизу свободной плоской тыльной поверхностью (назовем ее свободной границей или граница «образец-воздух»).

В нашем рассмотрении $i_1$ и $i_2$ — углы, под которыми распространяются продольные волны, $j_1$ и $j_2$ — углы, под которыми распространяются сдвиговые волны. Нижние индексы относятся к соответствующей среде, в которой распространяется волна, а буквенное обозначение соответствует типу волны ($P$ — продольная, $S$ — сдвиговая), также $\rho_1$, $\nu_{l1}$, $\nu_{t1}$ и $\rho_2$, $\nu_{l2}$, $\nu_{t2}$ — обозначения плотностей и скоростей продольных и сдвиговых волн соответственно в средах 1 и 2.

Рассмотрим продольную волну $P_1$, падающую из среды 1 (преобразователя) в среду 2 (исследуемого образца). На границе раздела возникают две отраженные волны: продольная $P_{1O}$, которая в дальнейшем служит опорным сигналом, и сдвиговая $S_{1O}$, которая дополнительной информации не несет. На этой же границе раздела двух сред возникают две прошедшие в среду 2 волны: продольная $P_2$ и сдвиговая $S_2$. При отражении волны $P_2$ от свободной границы образца появляются две волны: отраженная продольная $P_{O2}$ и сдвиговая $S_{O2}$. Волна $P_{O2}$, преломляясь на границе «2-1», приводит к продольной волне, которая при регистрации пьезоприемником $a$ создает донный сигнал. Волна $S_{O2}$ на границе «2-1» преобразуется в продольную. Возникающие на границе «2-1» сдвиговые волны в дальнейшем мы не рассматриваем, поскольку наш пьезоприемник регистрирует только продольные колебания. При отражении от свободной границы $S_2$ возникает продольная волна $P_{2O}$, которая пришла в ту же точку $M$ синфазно, что и $S_{O2}$. В результате сложения двух данных волн возникает продольная волна $P_{1пр}$, которая и регистрируется. Особенность данной волны заключается в следующем. Путь $h$ внутри образца она распространялась как сдвиговая, такой же путь — как

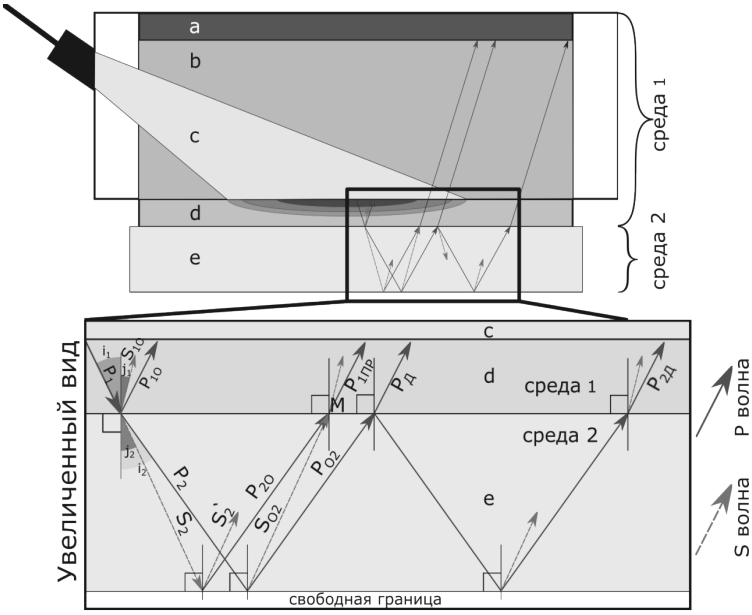


*Рис. 1. Схема образующихся волн при измерении их скоростей при одностороннем доступе к образцу с помощью лазерного ультразвука в режиме эхо-импульсов:* a — приемник; b — прозрачная призма; c — лазерное излучение; d — ОА генератор; e — образец
*Fig. 1. Scheme of the generated waves when measuring their velocities with one-sided access to the sample using laser ultrasound in the pulse echo mode:* a — receiver; b — transparent prism; c — laser radiation; d — OA generator; e — sample

продольная. Это дает возможность рассчитать скорость сдвиговой волны. Конкретизируем данную процедуру.

По закону Снелла,

$$\sin i_1 / v_{l1} = \sin i_2 / v_{l2} = \sin j_1 / v_{t1} = \sin j_2 / v_{t2}.$$

Введём лучевой параметр:

$$p = \frac{\sin i}{v_l} = \frac{\sin j}{v_t}, \tag{1}$$

который однозначно определяет угол распространения волны заданного типа в среде. На каждой границе раздела сред происходит конверсия (трансформация) мод. Коэффициенты прохождения, отражения и трансформации волн для каждого значения $p$ плоских монохроматических волн получены в [18] при решении задач количественной сейсмологии. Однако данные выражения справедливы и для упругих волн ультразвукового диапазона частот. Коэффициенты, необходимые для расчёта амплитуды волны $P_{1пр}$ в виде $P_1 \to S_2 \to P_{2O} \to P_{1пр}$ и $P_1 \to P_2 \to$ $\to P_{2O} \to P_{1пр}$ приведены в табл. 1.

В табл. 1 используются параметры, значения которых приведены в [18]. Проведя простые математические операции, легко видеть, что

$$P_1P_2 \cdot P_2S_{O2} \cdot S_{O2}P_{1пр} = P_1S_2 \cdot S_2P_{2O} \cdot P_{2O}P_{1пр} = -16\rho_2\rho_1 \frac{\cos i_2}{v_{l2}} \frac{\cos i_1}{v_{l1}} \frac{\cos j_2}{v_{t2}} \left( \frac{1}{v_{t2}^2} - 2p^2 \right) \frac{FGp^2}{D^2 D_2^F}. \tag{2}$$

*Таблица 1*

***Коэффициенты прохождения, отражения и трансформации мод***
***Coefficients of transmission, reflection, and transformation of modes***

| № | Коэффициент преобразования волны | Формула коэффициента |
|---|---|---|
| 1 | Коэффициент прохождения продольной волны в преобразователе в продольную в образце | $P_1P_2 = 2\rho_1 \frac{\cos i_1}{v_{l1}} F \frac{v_{l1}}{v_{l2}} \Big/ D$ |
| 2 | Коэффициент отражения продольной волны в сдвиговую на свободной поверхности образца | $P_2S_{O2} = 4\frac{v_{l2}}{v_{t2}} p \frac{\cos i_2}{v_{l2}} \left(\frac{1}{v_{t2}^2} - 2p^2\right) \Big/ D_2^F$ |
| 3 | Коэффициент трансформации сдвиговой волны в образце в продольную в преобразователе | $S_{O2}P_{1пр} = -2\rho_2 \frac{\cos j_2}{v_{t2}} Gp \frac{v_{t2}}{v_{l1}} \Big/ D$ |
| 4 | Коэффициент трансформации продольной волны в преобразователе в сдвиговую в образце | $P_1S_2 = -2\rho_1 \frac{\cos i_1}{v_{l1}} Gp \frac{v_{l1}}{v_{t2}} \Big/ D$ |
| 5 | Коэффициент отражения сдвиговой волны в продольную на свободной поверхности образца | $S_2P_{2O} = 4\frac{v_{t2}}{v_{l2}} p \frac{\cos j_2}{v_{t2}} \left(\frac{1}{v_{t2}^2} - 2p^2\right) \Big/ D_2^F$ |
| 6 | Коэффициент прохождения продольной волны в образце в продольную в преобразователе | $P_{2O}P_{1пр} = 2\rho_2 \frac{\cos i_2}{v_{l2}} F \frac{v_{l2}}{v_{l1}} \Big/ D$ |

Как видно из выражения (2) две продольные волны $P_1 \to S_2 \to P_{2O} \to \to P_{1пр}$ и $P_1 \to P_2 \to P_{2O} \to P_{1пр}$ приходят в точку *M* синфазно и с одинаковой амплитудой.

При этом время распространения двух этих волн также одинаково и равно:

$$T = h/v_{l2} + h/v_{t2}. \quad (3)$$

Поэтому измерив скорость продольных волн лазерным ультразвуком в режиме эхо-импульсов, из выражения (3) можно определить скорость сдвиговых волн.

**Результаты и обсуждение**

В рамках проведения физико-механических испытаний исследовались образцы известняка месторождения «Branco Valongo» из Португалии. Растровая электронная микроскопия показала, что все образцы сложены пелитоморфным тонкокристаллическим кальцитом, кристаллы которого менее 0,02 мм, структура пелитоморфная, относительно однородная, без явных структурных артефактов. Средний размер пор составил 32 мкм (рис. 2). Среднее значение пористости вех образцов составило не более 4,7 %.

Поэтому для проведения лазерно-ультразвукового исследования был отобран и подготовлен один характерный образец в виде пластины размером 40×40×3,1 мм, отклонение от параллельности граней составило 0,02 мм.

На рис. 3 приведены расчётная и экспериментальная временные формы ультразвуковых сигналов, полученных на образце известняка. Расчётный сигнал получен с помощью выражений для коэффициентов отражения, прохождения и трансформации и интегрирования по всему генерируемому диапазону частот и угловых направлений. При этом скорости продольных и сдвиговых волн подбирались таким образом,

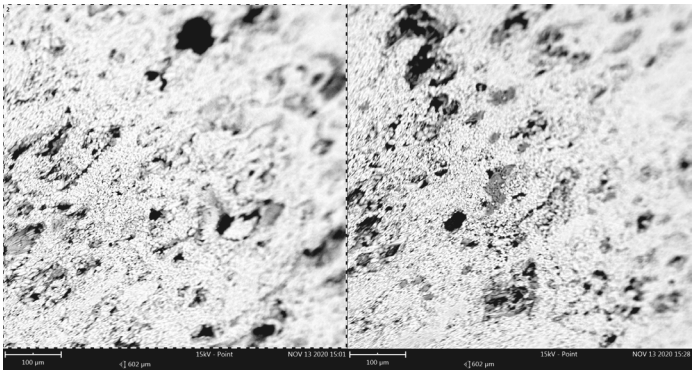


*Рис. 2. Снимок поверхности характерного образца известняка*
*Fig. 2. Image of the limestone sample surface*

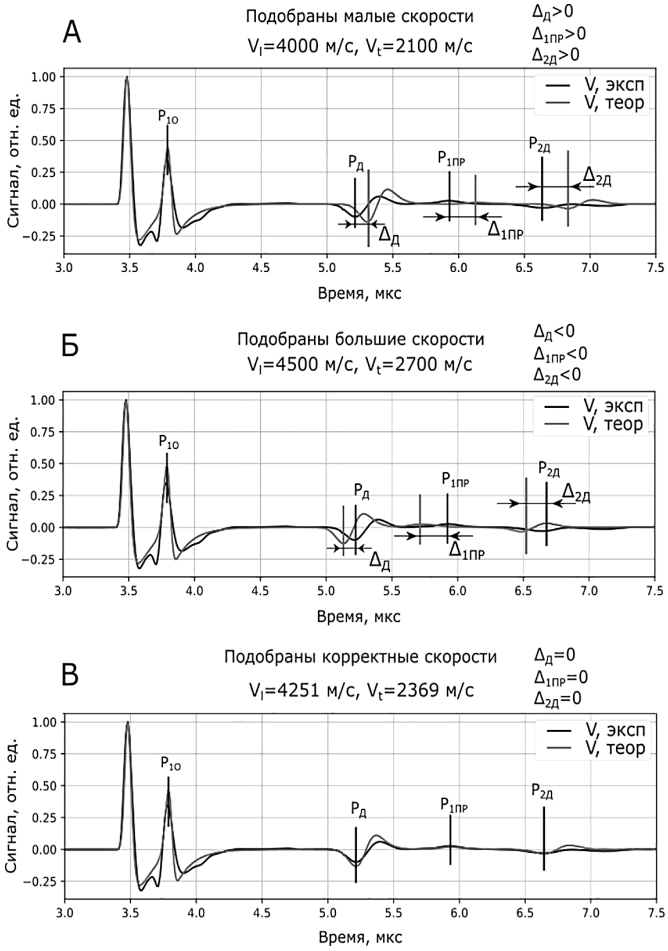


*Рис. 3. Расчётная и экспериментальная временные формы ультразвуковых сигналов на образце известняка при подборе малых (a), больших (b), корректных (c) скоростей продольных и сдвиговых волн:*
*Fig. 3. Calculated and experimental time forms of ultrasonic signals on a limestone sample*

*Таблица 2*
***Значения скоростей волн в водонасыщенном образце известняка.***
***The values of wave velocities in water-saturated limestone sample.***

| Параметр | Расчёт на основе временных задержек | Расчёт на основе разработанной аналитической модели | \|Разница\| |
|---|---|---|---|
| Образец | Известняк (водонасыщенный) | | – |
| Толщина образца, мм | 3,91 ± 0,02 | | – |
| Плотность образца, кг/м$^3$ | 2304,5 | | – |
| Скорость продольной волны, м/с | 4 338,7 | 4 251,0 | 87,7 |
| Скорость поперечной волны, м/с | 2 171,6 | 2 369,0 | 197,4 |
| Коэффициент Пуассона (динамический) | 0,33 | 0,27 | 0,06 |
| Модуль упругости (динамический) | 28,97 | 32,97 | 4,00 |

чтобы минимизировать ошибку времен распространения импульсов этих волн, отраженных от тыльной поверхности образца (рис. 3, *a, b*). Видно хорошее совпадение расчётного и экспериментального сигналов, что свидетельствует о корректности разработанной модели (рис. 3, *c*).

Скорость продольной волны определялась по измеренной толщине образца и времени задержки переотраженного импульса относительного первого донного сигнала.

Значения скоростей волн и расчитанные динамические упругие характеристики образца известняка представлены в табл. 2.

**Заключение**

Таким образцом, в данной работе была обоснована генерация сдвиговой волны на разделе границ двух сред на основе теории количественной сейсмологии. Были получены следующие результаты:

1. продольная волна, оставшаяся продольной при прохождении через границу «преобразователь-образец», преобразовавшаяся в сдвиговую на тыльной поверхности образца и преобразовавшаяся обратно в продольную на границе «преобразователь-образец», имеет ту же амплитуду, что и продольная волна, преобразовавшаяся в сдвиговую на границе «преобразователь-образец», преобразовавшаяся обратно в продольную на тыльной поверхности образца и оставшаяся продольной при повторном прохождении через границу «преобразователь-образец»;

2. рассчитано, что волны, описанные в п. 1 приходят в одну точку на границе раздела «образец-преобразователь» синфазно и имеют одно и то же значение амплитуды;

3. аналитически определенная временная форма сигнала и ее сравнение с экспериментальной временной формой;

4. Разработана методика определения скоростей упругих волн с помощью подбора временной формы сигналов.

Также было установлено, что использование оптико-акустического генератора и широкополосного пьезоэлектрического приёмника в режиме эхо-импульсов позволяет одновременно с высотой точностью регистрировать скорости продольных и сдвиговых волн и рассчитывать динамические модули упругости.

## 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. *Waqas U.*, *Ahmed M. F.* Prediction Modeling for the Estimation of Dynamic Elastic Young's Modulus of Thermally Treated Sedimentary Rocks Using Linear–no.nlinear Regression Analysis, Regularization, and ANFIS // Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, Vol. 53, Issue 12, pp. 5411—5428. DOI: 10.1007/s00603-020-02219-8.

3. *Hoek E.*, *Diederichs M. S.* Empirical estimation of rock mass modulus // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, Vol. 43, pp. 203—215.

4. *Sas I. E.*, *Morozov D. V.*, *Morozov N. A.* On calculation of the bearing capacity of selfopening ground anchors using PLAXIS 2D software package // Durability of Critical Infrastructure, Monitoring and Testing. Lecture no.tes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore, 2017, pp. 104—109. DOI: 10.1007/978-981-10-3247-9_12.

5. *Sabatakakis N.*, *Koukis G.*, *Tsiambaos G.*, *Papanakli S.* Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks // Engineering Geology, 2008, Vol. 97, pp. 80—90.

6. *Saad A.*, *Guedon S.*, *Martineau F.* Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze-thaw cycles: Experimental study of state and transfer parameters // Comptes Rendus Geoscience, 2010, Vol. 342, Issue 3, pp. 197—203.

7. *Li J.*, *Zhou K.*, *Zhang Y.*, *Xu Y.* Experiment study on physical characteristics in weathered granite under freezing-thawing cycles, Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) // Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, Vol. 45, Issue 3, pp. 798—802.

8. *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.

9. *Машинский Э. И.* Физические причины различия статических и динамических модулей упругости горных пород // Геология и геофизика. — 2003. — Т. 44. — no. 9. — С. 953—959.

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

11. ГОСТ 21153.7—75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. — 8 с.

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

13. *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.

14. *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.

15. *Karabutov A. A.*, *Podymova N. B.*, *Cherepetskaya E. B.* Determination of uniaxial stresses in steel structures by the laser-ultrasonic method // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2017, Vol. 58, Issue 3, pp. 503—510. DOI: 10.1134/S0021894417030154.

16. *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.

17. *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.

18. *Аки К.*, *Ричардс П.* Количественная сейсмология. — Москва: Мир, 1983. — 521 с. ГИАБ

## REFERENCES

1. Osipov Yu. V., Koshelev A. E. Modern methods for determining the deformation properties of rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 11, pp. 68—75. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-68-75.

2. Waqas U., Ahmed M. F. Prediction Modeling for the Estimation of Dynamic Elastic Young's Modulus of Thermally Treated Sedimentary Rocks Using Linear–no.nlinear Regression Analysis, Regularization, and ANFIS. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, Vol. 53, Issue 12, pp. 5411—5428. DOI: 10.1007/s00603-020-02219-8.

3. Hoek E., Diederichs M. S. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006, Vol. 43, pp. 203—215.

4. Sas I. E., Morozov D. V., Morozov N. A. On calculation of the bearing capacity of selfopening ground anchors using PLAXIS 2D software package. *Durability of Critical Infrastructure, Monitoring and Testing. Lecture no.tes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, 2017, pp. 104—109. DOI: 10.1007/978-981-10-3247-9_12.

5. Sabatakakis N., Koukis G., Tsiambaos G., Papanakli S. Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks. *Engineering Geology*. 2008, Vol. 97, pp. 80—90.

6. Saad A., Guedon S., Martineau F. Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze-thaw cycles: Experimental study of state and transfer parameters. *Comptes Rendus Geoscience*. 2010, Vol. 342, Issue 3, pp. 197—203.

7. Li J., Zhou K., Zhang Y., Xu Y. Experiment study on physical characteristics in weathered granite under freezing-thawing cycles, Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2014, Vol. 45, Issue 3, pp. 798—802.

8. 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.

9. Mashinskij Je. I. Physical reasons for the difference between static and dynamic elastic moduli of rocks. *Geology and Geophysics*, 2003, Vol. 44, no. 9, pp. 953—959. [In Russ].

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

11. *Porody gornye. Metod opredelenija skorostej rasprostranenija uprugih prodol'nyh i poperechnyh voln*, GOST 21153.7—75, Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov, 2001, 8 p.

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

*13.* 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

14. 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.

15. Karabutov A. A., Podymova N. B., Cherepetskaya E. B. Determination of uniaxial stresses in steel structures by the laser-ultrasonic method. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017, Vol. 58, Issue 3, pp. 503—510. DOI: 10.1134/S0021894417030154.

16. 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.

17. 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.

18. Aki K., Richards P. *Kolichestvennaya sejsmologiya* [Quantitative seismology]. Moscow, Mir, 1983, 521 p. [In Russ]

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Шибаев Иван Александрович*[1] — аспирант, mrdfyz@mail.ru;
*Бычков Антон Сергеевич*[1] — канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, abychkov@optoacoustic.ru;
[1] Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС» Горный институт, Москва, Россия.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Shibaev I. A.*[1], PhD-student, mrdfyz@mail.ru;
*BychkovA. S.*[1], Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Research Assistant, abychkov@optoacoustic.ru;
[1] National Research Technological University “MISiS” Mining Institute, Moscow, Russia.

Получена редакцией 20.01.2021; получена после рецензии 24.02.2021; принята к печати 10.03.2021.
Received by the editors 20.01.2021; received after the review 24.02.2021; accepted for printing 10.03.2021.