

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ ОБРАЗЦОВ ИЗВЕСТНЯКА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

И.А. Шибает<sup>1</sup>, В.А. Винников<sup>1</sup>, Г.Д. Степанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», Москва, Россия,  
e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com

**Аннотация:** В области решения задач инженерной геологии современной нефтедобывающей промышленности часто приходится строить геомеханические модели, использование которых позволяет повышать эффективность разработки или эксплуатации исследуемых объектов. Одними из входных параметров таких моделей являются статические упругие модули горных пород. Представлены результаты исследований физико-механических свойств образцов горных пород — известняков неметаморфического диагенеза. Проведены прецизионные измерения скоростей продольных и сдвиговых упругих волн с погрешностью 0,2% на основе лазерно-ультразвуковой диагностики. По данным скоростям рассчитаны динамические модули упругости. Для определения статических модулей упругости выполнена серия экспериментов по ГОСТ 21153.2-84 и ГОСТ 28985-91 на одноосное сжатие образцов горных пород и для определения деформационных характеристик соответственно. Установлена корреляционная зависимость между статическим и динамическим модулем упругости для образцов известняка. Найденная взаимосвязь между статическими и динамическими модулями упругости известняка позволила сделать вывод о том, что статический модуль упругости можно оценивать с помощью неразрушающих методов исследования, что существенно упрощает предварительный этап диагностики образцов при ограниченном количестве проб керна.

**Ключевые слова:** керн, известняк, лазерно-ультразвуковая диагностика, статический модуль упругости, динамический модуль упругости, корреляционная зависимость.

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

**Для цитирования:** Шибает 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.

### Determining elastic properties of sedimentary strata in terms of limestone samples by laser ultrasonics

I.A. Shibaev<sup>1</sup>, V.A. Vinnikov<sup>1</sup>, G.D. Stepanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,  
e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com

---

**Abstract:** Geological engineering often uses geomechanical modeling aimed to enhance efficiency of mining or performance of structures. One of the input parameters for such models are the static elastic moduli of rocks. This article presents the studies into the physical and mechanical properties of rocks—limestone of non-metamorphic diagenesis. The precision measurements of P- and S-waves are carried out to an accuracy of 0.2% by laser ultrasonics. The static moduli of elasticity and the deformation characteristics of rocks are determined in the uniaxial compression tests by the standards of GOST 21153.2-84 and GOST 28985-91, respectively. The correlation dependence is found between the static and dynamic elasticity moduli in limestone samples. The found correlation allows drawing the conclusion that the static modulus of elasticity can be estimated in non-destructive tests, which largely simplifies preliminary diagnostics of samples in case of limited number of test core.

**Key words:** core, limestone, laser ultrasonics, static elasticity modulus, dynamic elasticity modulus, correlation dependence.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 19-35-90063.

**For citation:** Shibaev I.A., Vinnikov V.A., Stepanov G.D. Determining elastic properties of sedimentary strata in terms of limestone samples by laser ultrasonics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(7):125-134. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134.

---

## Введение

Модуль упругости является одним из наиболее важных параметров горных пород для проведения численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива, корректного использования геоматериала при строительстве [1–3].

Для определения упругих свойств горных пород существуют как разрушающие, так и неразрушающие методы. К первым в большинстве случаев относится так называемый статический метод, связанный с деформированием образца внешней одноосной нагрузкой с одновременным измерением возникающих в образце продольных и поперечных деформаций с помощью, например, тензометрической станции [4–5]. К неразрушающим методам следует отнести динамический ультразвуковой метод, когда производятся измерения скоростей продольных и поперечных волн в образце и по известным формулам рассчитываются модуль Юнга и коэффициент Пуассона. В основном значения упругих характеристик, получаемых двумя

вышеуказанными методами, существенно различаются. Динамический модуль упругости обычно превышает статический модуль на 20% и более в зависимости от состава, структуры и текстуры породы [6–9].

Тем не менее, в настоящее время динамический метод определения упругих характеристик пород получает все большее распространение благодаря простоте и значительно меньшей трудоемкости измерений [10]. Поэтому возникает вопрос о взаимосвязи упругих свойств, полученных двумя разными методами, и возможности дальнейшего определения статического модуля упругости через динамический модуль по корреляционной зависимости. В некоторых нормативных документах [11] приводится ряд формул пересчета динамических показателей деформационных свойств в статические. Однако единой взаимосвязи между статическим и динамическим модулями упругости нет. Для образцов разных генотипов предлагаются разные уравнения.

Целью данной работы является установление корреляционной взаимосвязи

между статическим и динамическим модулями, рассчитанными по прецизионно измеренным скоростям упругих волн на основе лазерно-ультразвуковой диагностики [12 – 20] для осадочных горных пород на примере образцов известняка.

### Методы и материалы

В данной работе исследовалась серия из 55 образцов известняка (горная порода карбонатной подгруппы с главными породообразующими составляющими кальцита, доломита и глинистых минералов в примесях). Для исследования структуры образцов были изготовлены аншлифы из данной серии. Физико-механические свойства изучались на образцах в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами 84×42×42 мм в соответствии с ГОСТ 21153.2-84.

По аншлифам с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе Phenom ProX было определено, что структура образцов мелкозернистая с размерами зерен, лежащими в диапазоне 15 – 40 мкм. Поверхностная пористость колеблется от 1% до 3%, средний размер пор составляет 25 мкм, а наибольший достигает 50 мкм. Элементный состав образцов: кальций (36,5%), кислород (49,1%), углерод (13,8%), незначительное количество (до 0,2%) кремния, калия, магния. Основная площадь поверхности геоматериала заполнена плотно цементированными зернами.

Для определения таких физико-механических свойств образцов известняка, как предел прочности при одноосном сжатии  $\sigma$ , модуль упругости  $E$  (статический), коэффициент Пуассона  $\mu$ , были испытаны 5 выборки по 11 образцов (10 для определения предела прочности, 1 для определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона для каждой выборки соответственно). Для определения этих свойств использо-

вались пресс ТП-1-1500 с максимальной нагрузкой 1500 кН и тензометрический аппаратно-программный комплекс на основе крейтовой системы LTR и программного комплекса АСТЕСТ-ОЕМ (модули LTR 212М-2 и LTR-EU-2-5). Пресс и тензометрический аппаратно-программный комплекс были синхронизированы по времени регистрации напряжения. Первоначально для серии образцов измерялся предел прочности при одноосном сжатии. Далее регистрация продольной и поперечной деформации образцов известняка проводилась при нагружении образцов в интервале от 5% до 60% от предела прочности при сжатии. Предполагалось, что в данном интервале нагрузок все образцы ведут себя как упругие тела. На определенных участках «ветвей» нагрузки (разгрузки) и соответствующем интервале деформации вычислялись статические модули упругости.

Для определения динамических модулей упругости проводились прецизионные измерения скоростей продольной и поперечной волны в образцах известняка при использовании лазерного ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М (а только потом эти же образцы испытывались механически — для определения статических модулей упругости). Принцип работы данного дефектоскопа следующий (рис. 1). Короткий наносекундный лазерный импульс, который, попадая в специальный оптико-акустический генератор, возбуждает в нем ультразвуковой импульс продольной волны со строго контролируемой формой, длительностью порядка 80 нс и амплитудой давления до 0,1 МПа [21].

Широкополосным пьезоприемником, который совмещен с генератором, регистрируются сигналы, отраженные от границы раздела «генератор-образец» (опорный сигнал) и от тыльной поверхности образца.

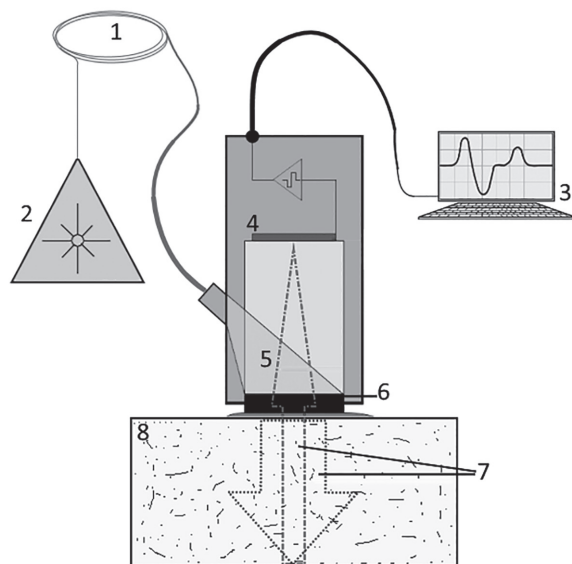


Рис. 1. Схема измерения скоростей упругих волн в образце известняка с помощью лазерного ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М: 1 – оптический кабель, 2 – лазер, 3 – персональный компьютер, 4 – приемник, 5 – лазерное излучение, 6 – оптико-акустический генератор, 7 – импульсы, 8 – образец горной породы

Fig. 1 – Measurement design for elastic wave velocities in limestone samples using laser ultrasonic defect detector UDL-2M: 1 – optical cable; 2 – laser; 3 – PC; 4 – receiver; 5 – laser radiation; 6 – optical-acoustic generator; 7 – impulses; 8 – rock sample

По временной задержке  $\Delta T$  отраженного от тыльной поверхности сигнала относительно опорного при известной толщине образцов  $H$ , рассчитываются значения скоростей продольных волн в точках прозвучивания. Импульс поперечной волны появляется между первым и вторым отраженными от донной поверхности сигналами продольной волны за счет граничных условий. По временной задержке данного импульса относительно опорного сигнала рассчитывается скорость поперечной волны  $V_s$ .

Следует отметить, что каждой точке прозвучивания соответствует область с площадью поперечного сечения порядка  $12 \text{ мм}^2$ .

Важно отметить, что погрешность измерения скоростей не превосходила  $0,2\%$ . При известной плотности образцов  $\rho$  и по скоростям упругих волн можно рассчитать динамические упругие ло-

кальные модули с погрешностью не более  $1\%$  для модуля Юнга  $E$  и не более  $4\%$  для коэффициента Пуассона  $\mu$ , которые определяются соотношениями [17, 20, 23]:

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

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

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (3)$$

где  $G$  – модуль сдвига,  $\rho$  – плотность,  $\chi = (V_p / V_s)^2$  – квадрат отношения значений скоростей продольной волны к поперечной.

### Результаты

В табл. 1 приведены результаты одной из выборок серии образцов (общая пористость всех образцов составила око-

ло 3%): среднее значение предела прочности  $\bar{\sigma}$  при одноосном сжатии, определенное для серии образцов известняка,  $\delta$  – стандартное отклонение по  $N = 10$  испытаниям,  $V$  – коэффициент вариации,  $\overline{\Delta A}$  – среднее значение абсолютной погрешности  $N$  измерений,  $\varepsilon$  – относительная погрешность,  $\varepsilon/V$  – значение отношения относительной погрешности к коэффициенту вариации,  $\alpha$  – надежность.

На рис. 2 представлена диаграмма деформирования для одного из образцов известняка.

Для определения статического модуля упругости ( $E_s$ ) рассматривался участок разгрузки на диаграмме деформирования.

Значения относительной продольной деформации на участке разгрузки хоро-

шо аппроксимируются линейной функцией (коэффициент детерминации которой равен 0,98).

Значение статического модуля упругости для одного из образца известняка ( $E_s$ ) на данном участке составило 33,5 ГПа.

В табл. 2 приведены значения измеренных скоростей продольных и поперечных волн, а также рассчитанные с использованием выражений (1) – (3) динамические упругие свойства для одного из образцов из общей серии. Далее были определены динамические упругие свойства для оставшихся 4 образцов известняка из общей серии, средние значения каждого из которых указаны на рис. 3.

Полученные значения статических и динамических модулей ( $E_s$  и  $E_d$ ) образцов

Таблица 1

**Результаты испытаний серии образцов известняка при одноосном сжатии**  
**Test results for a series of limestone samples under uniaxial compression**

$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$	$V$ , %	$\overline{\Delta A}$ , МПа	$\varepsilon$ , %	$\varepsilon/V$	$\alpha$ , %
49,00	2,21	4,51	1,80	3,67	0,81	96

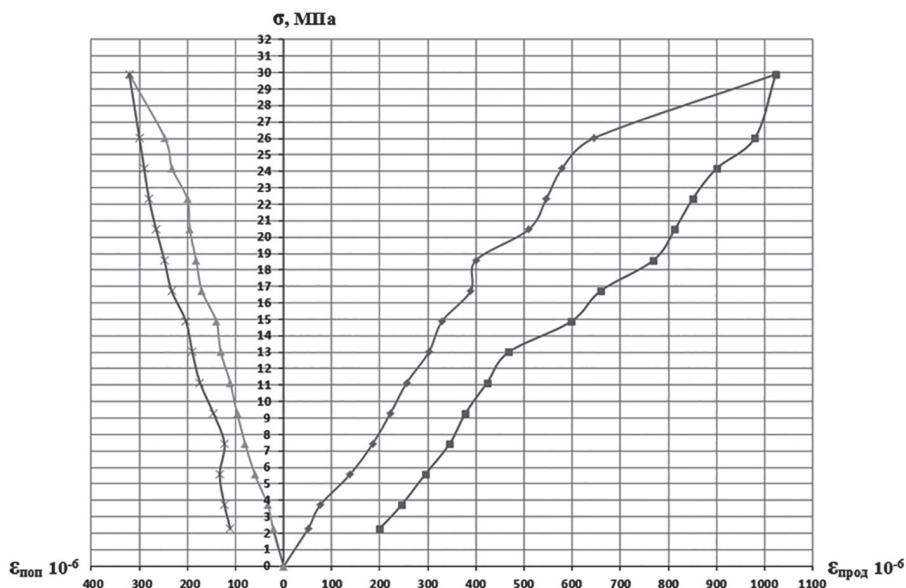


Рис. 2. Диаграмма деформирования одного из образцов известняка

Fig. 2. Deformation curve of limestone sample

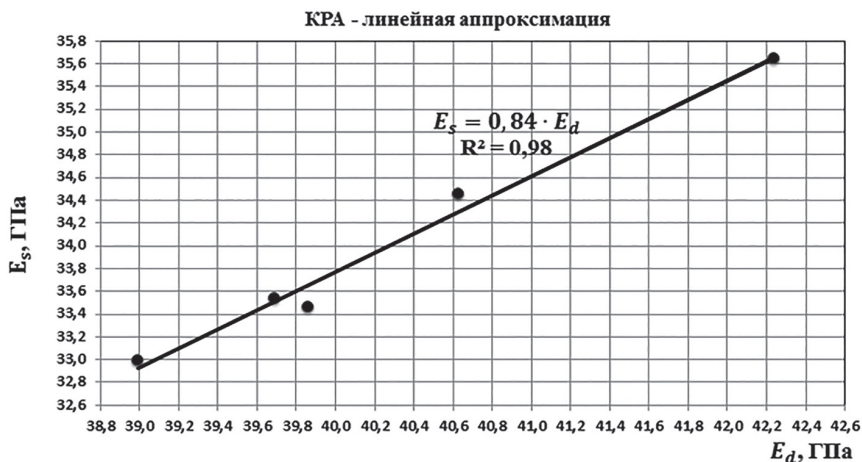


Рис. 3. Результаты корреляционно-регрессионного анализа значений статического и динамического модуля упругости

Fig. 3. Correlation regression analysis data on static and dynamic moduli of elasticity

из общей серии были обработаны статистически на основе корреляционно-регрессионного анализа (КРА) для построения аппроксимирующей кривой. На рис. 3 приведена найденная зависимость между установленными значениями динамических модулей упругости и статических для образцов известняка.

Оказалось, что значения динамических и статических модулей упругости исследуемых образцов при условии, что общая пористость была приблизительно равна, хорошо аппроксимируется линейной функцией, для которой коэффициент детерминации  $R^2$  равен 0,98, что говорит о хорошей сходимости данных статических и динамических измерений.

### Обсуждения

Результаты показали, что статический модуль упругости, определяемый разрушающим методом, пропорционален значению динамического модуля Юнга, определенному из прецизионных ультразвуковых измерений скоростей упругих волн. Коэффициент пропорциональности  $k = 0,84$ , то есть  $E_s = 0,84 \cdot E_d$ .

Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с существующими данными по корреляции модулей упругости образцов горной породы карбонатной группы [22].

В работе [22] было установлено, что для горных пород отношение  $k = E_d / E_s$  лежит в диапазоне от 0,5 до 2 и явля-

Таблица 2

### Значения акустических, плотностных и упругих характеристик для одного из образцов известняка

#### Values of acoustic, density and elastic characteristics of limestone samples

Значение	$V_p$ , м/с	$V_s$ , м/с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\chi$	$\mu$	$E_d$ , ГПа
Максимальное	4178	2478	2689	2,95	0,24	40,2
Минимальное	4121	2425	2655	2,77	0,22	39,1
Среднее	4149	2454	2676	2,86	0,23	39,7
$\delta$	29	23	11,9	0,06	0,01	0,4
$V$ , %	0,49	0,80	0,45	2,2	4,0	0,93

ется очень чувствительным к наличию трещин, пористости, геометрии и ориентации зерен. При этом было показано, что для карбонатных пород, у которых  $E_d = 40$  ГПа, данное соотношение лежит в диапазоне от 1 до 1,2, что хорошо согласуется с полученными результатами.

Таким образом, применение методов лазерно-ультразвуковой диагностики для определения упругих свойств таких осадочных горных пород, как известняки, является эффективным. В первую очередь, эта эффективность обусловлена сокращением времени проведения эксперимента и хорошей сходимостью результатов с классическими методами испытаний физико-механических свойств горных пород.

С другой стороны, есть существенные минусы, такие, как сложность интерпретирования результатов исследования, «неполнота» базы исследования

других генотипов горных пород, например, магматических и метаморфических.

Также актуальной остается задача использования масштабного эффекта для «перехода» от малых к большим образцам для дальнейшего использования полученных значений модуля Юнга при расчете напряженно-деформированного состояния массива.

### **Выводы, заключение**

В данной работе исследовались образцы известняков, для которых были определены прочностные свойства и деформационные характеристики. Найдена корреляционная связь значений динамических и статических модулей упругости. Проведение исследований методом лазерно-ультразвуковой диагностики является перспективным направлением для экспресс-оценки статических модулей упругости.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Canady W.J.* A method for full-range Young's Modulus correction // Paper SPE 143604, presented at the SPE North American Unconventional Gas Conference and Exhibition held in The Woodlands, Texas, USA. 14–16 June 2011.

2. *Морозов В.Н., Маневич А.И., Татаринев В.Н.* Моделирование напряженного состояния и геодинамическое районирование сейсмически активных регионов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 8. — С. 123–132. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-123-132.

3. *Sas I.E., Morozov D.V., Morozov N.A.* On calculation of the bearing capacity of self-opening ground anchors using PLAXIS 2D software package / Durability of Critical Infrastructure, Monitoring and Testing. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore, 2017. Pp. 104–109. DOI: 10.1007/978-981-10-3247-9\_12.

4. *ГОСТ 21153.2-84.* Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. — 8 с.

5. *ГОСТ 28985-91.* Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. — 11 с.

6. *Усольцева О.М., Цой П.А., Семенов В.Н.* Влияние структуры слоистых горных пород и геоматериалов на деформационно-прочностные свойства при растяжении и объемном сжатии // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2016. — Т. 2. — № 4. — С. 48–53.

7. *Saenger E.H., Kruger O.S., Shapiro S.A.* Effective elastic properties of fractured rocks: dynamic vs. static considerations // International Journal of Fracture. 2006. Vol. 139. No 3. Pp. 569–576.

8. *Christaras B., Auger F., Mosse E.* Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods // Materials and Structures. 1994. Vol. 27. No 4. Pp. 222–228.

9. Фролова Ю. В., Патрушева Н. А. Сравнительный анализ статического и динамического модулей упругости гранитов и гнейсов Алданского щита / Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. — М.: РУДН, 2016. — С. 100—105.

10. King M. S., Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian shield // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1983. Vol. 20. No 5. Pp. 237—241.

11. Свод правил по инженерным изысканиям для строительства СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований. 2004.

12. 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. No 9. Pp. 84—92.

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. Pp. 242—247.

14. Kravcov A. A., Konvalinka A., Vinnikov V. A., Shibaev I. A., Ivanov P. N. On the issue of typical grain size assessment by the methods of broadband laser opto-acoustics // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 755. Pp. 212—218.

15. Zarubin V. P., Bychkov A. S., Simonova V. A., Zhigarkov V. S., Karabutov A. A., Cherepetskaya E. B. A refraction-corrected tomographic algorithm for immersion laser ultrasonic imaging of solids with piecewise linear surface profile // Applied Physics Letters. 2018. Vol. 112. No 21. Article 214102.

16. Bychkov A. S., Zarubin V. P., Karabutov A. A., Simonova V. A., Cherepetskaya E. B. On the use of an optoacoustic and laser ultrasonic imaging system for assessing peripheral intravenous access // Photoacoustics. 2017. Vol. 5. Pp. 10—16. DOI: 10.1016/j.pacs.2017.01.002.

17. Karabutov A. A., Podymova N. B., Cherepetskaya E. B. Measuring the dependence of the local Young's modulus on the porosity of isotropic composite materials by a pulsed acoustic method using a laser source of ultrasound // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2013. Vol. 54. No 3. Pp. 500—507.

18. 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. Article 085401.

19. Kravcov A., Shibaev I. A., Blokhin, D. I., Bychkov A. S., Cherepetskaya E. B., Krapivnoi M. M., Zarubin V. P. Examination of structural members of aerial vehicles by laser ultrasonic structuroscopy // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. No 11. Pp. 2258—2265.

20. Bychkov A. S., Simonova V. A., Zarubin V. P., Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A. The progress in photoacoustic and laser ultrasonic tomographic imaging for biomedicine and industry. A review // Applied Sciences (Switzerland). 2018. Vol. 8. No 10. Article 1931.

21. Черепецкая Е. Б., Иньков В. Н. Экспериментальное исследование нелинейного искажения формы мощных ультразвуковых импульсов при распространении их в горных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2005. — № 3. — С. 41—44.

22. Martinez-Martinez J., Benavente D., Garcia-del-Cura M. A. Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2012. Vol. 71. No 2. Pp. 263—268.

23. 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. **PLAB**



## REFERENCES

1. Canady W.J. A method for full-range Young's Modulus correction. *Paper SPE 143604, presented at the SPE North American Unconventional Gas Conference and Exhibition held in The Woodlands, Texas, USA.* 14–16 June 2011.
2. Morozov V.N., Manevitch A.I., Tatarinov V.N. Stress state modeling and geodynamic zoning in seismically active regions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no 8, pp. 123–132. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-123-132.
3. Sas I.E., Morozov D.V., Morozov N.A. On calculation of the bearing capacity of self-opening ground anchors using PLAXIS 2D software package. *Durability of Critical Infrastructure, Monitoring and Testing. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Singapore, 2017. Pp. 104–109. DOI: 10.1007/978-981-10-3247-9\_12.
4. *Porody gornye. Metody opredeleniya predelaprochnosti pri odnoosnom szhatii. GOST 21153.2-84* [Rocks. Methods for determination of axial compression strength. State Standart 21153.2-84], Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2001, 8 p.
5. *Porody gornye. Metod opredeleniya deformatsionnykh kharakteristik pri odnoosnom szhatii. GOST 28985-91* [Rocks. Method for determination of deformation characteristics under uniaxial compression. State Standart 28985-91], Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2004, 11 p.
6. Usol'tseva O. M., Tsoy P.A., Semenov V. N. Influence of the structure of layered rocks and geomaterials on the deformation and strength properties of tension and volume compression. *Interespo Geo-Sibir'*. 2016. vol. 2, no 4, pp. 48–53. [In Russ].
7. Saenger E. H., Kruger O. S., Shapiro S. A. Effective elastic properties of fractured rocks: dynamic vs. static considerations. *International Journal of Fracture.* 2006. Vol. 139. No 3. Pp. 569–576.
8. Christaras B., Auger F., Mosse E. Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. *Materials and Structures.* 1994. Vol. 27. No 4. Pp. 222–228.
9. Frolova Yu. V., Patrusheva N.A. Comparative analysis of static and dynamic elastic modulus of granites and gneisses of the Aldan shield. *Sergeevskie chteniya. Inzhenernaya geologiya i geoekologiya. Fundamental'nye problemy i prikladnye zadachi* [Sergeyev readings. Engineering Geology and Geocology Fundamental Problems and Applied Problems], Moscow, RUDN, 2016, pp. 100–105.
10. King M.S., Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian shield. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.* 1983. Vol. 20. No 5. Pp. 237–241.
11. *Svod pravil po inzhenernym izyskaniyam dlya stroitel'stva SP 11-105-97. Inzhenerno-geologicheskies izyskaniya dlya stroitel'stva.* Ch. VI. Pravila proizvodstva geofizicheskikh issledovaniy [The code of rules for engineering surveys for construction SP 11-105-97. Engineering-geological surveys for construction. Part VI. Rules for the production of geophysical surveys], 2004. [In Russ].
12. 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. No 9. Pp. 84–92.
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. Pp. 242–247.
14. Kravcov A.A., Konvalinka A., Vinnikov V.A., Shibaev I.A., Ivanov P.N. On the issue of typical grain size assessment by the methods of broadband laser opto-acoustics. *Key Engineering Materials.* 2017. Vol. 755. Pp. 212–218.
15. Zarubin V. P., Bychkov A.S., Simonova V.A., Zhigarkov V.S., Karabutov A.A., Cherepetskaya E. B. A refraction-corrected tomographic algorithm for immersion laser ultrasonic imaging

of solids with piecewise linear surface profile. *Applied Physics Letters*. 2018. Vol. 112. No 21. Article 214102.

16. Bychkov A. S., Zarubin V. P., Karabutov A. A., Simonova V. A., Cherepetskaya E. B. On the use of an optoacoustic and laser ultrasonic imaging system for assessing peripheral intravenous access. *Photoacoustics*. 2017. Vol. 5. Pp. 10–16. DOI: 10.1016/j.pacs.2017.01.002.

17. Karabutov A. A., Podymova N. B., Cherepetskaya E. B. Measuring the dependence of the local Young's modulus on the porosity of isotropic composite materials by a pulsed acoustic method using a laser source of ultrasound. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2013. Vol. 54. No 3. Pp. 500–507.

18. 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. Article 085401.

19. Kravcov A., Shibaev I. A., Blokhin, D. I., Bychkov A. S., Cherepetskaya E. B., Krapivnoi M. M., Zarubin V. P. Examination of structural members of aerial vehicles by laser ultrasonic structuroscopy. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. No 11. Pp. 2258–2265.

20. Bychkov A. S., Simonova V. A., Zarubin V. P., Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A. The progress in photoacoustic and laser ultrasonic tomographic imaging for biomedicine and industry. A review. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018. Vol. 8. No 10. Article 1931.

21. Cherepetskaya E. B., In'kov V. N. Experimental study of nonlinear distortion of the form of powerful ultrasonic pulses during their propagation in rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2005, no 3, pp. 41–44. [In Russ].

22. Martínez-Martínez J., Benavente D., García-del-Cura M. A. Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2012. Vol. 71. No 2. Pp. 263–268.

23. 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;(6):56-65. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-56-65.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шibaев Иван Александрович<sup>1</sup> – аспирант, e-mail: mrdfyz@mail.ru,

Винников Владимир Александрович<sup>1</sup> – д-р физ.-мат. наук,  
доцент, зав. кафедрой, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com,

Степанов Георгий Дмитриевич<sup>1</sup> – студент,  
e-mail: georgest0503@yandex.ru,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

**Для контактов:** Винников В. А., e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I. A. Shibaev<sup>1</sup>, Graduate Student, e-mail: mrdfyz@mail.ru,  
V. A. Vinnikov<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Assistant Professor,  
Head of Chair, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com,

G. D. Stepanov<sup>1</sup>, Student, e-mail: georgest0503@yandex.ru,  
<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS»,

119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** V. A. Vinnikov,  
e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com.

Получена редакцией 13.03.2020; получена после рецензии 08.04.2020; принята к печати 20.06.2020.

Received by the editors 13.03.2020; received after the review 08.04.2020; accepted for printing 20.06.2020.