

Э.А. Эртуганова, В.А. Винников, И.А. Шибает, И.А. Павлов

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ОЦЕНКЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ, ПРОШЕДШИХ ЧЕРЕЗ ОБРАЗЕЦ ГЕОМАТЕРИАЛА*

Дан обзор неразрушающих методов получения информации о внутренней структуре и фазовом составе образцов геоматериалов. Сделаны теоретические оценки спектров оптико-акустических сигналов; установлен необходимый для исследования образцов горных пород частотный диапазон. Выполнены оценки необходимых параметров возбуждаемых ультразвуковых импульсов продольных волн для определения размеров зерен и микротрещин. Показана возможность управления параметрами импульса за счет выбора материала оптико-акустического генератора. Исследовано влияние на спектральные характеристики дифракции и рассеяния на неоднородностях геосреды. Получены спектры широкополосных акустических сигналов для оптико-акустических генераторов, выполненных из различных материалов, при различных длительностях лазерного импульса, а также с учетом дифракции и рассеяния. Установлены особенности изменения спектров рассеяния в зависимости от характерных масштабов зерен. Показано, что фиксируя частоты, соответствующие переходам от одной области к другой, можно оценить характерные масштабы рассеивателей: максимальный, минимальный и средний. Таким образом, измеряя амплитудные спектры исходного и прошедшего через образец сигнала, возможно определить характерные размеры зерен.

Ключевые слова: внутренняя структура; фазовый состав образцов; амплитудные спектры оптико-акустических сигналов; оптико-акустический генератор; частотная зависимость коэффициента рассеяния; характерные масштабы зерен.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-17-10181).

Введение

Исследование внутренней структуры образцов геоматериалов, определение характерных размеров зерен, наличия пор и определение структуры межзеренных границ является актуальным для решения задач разрушения в процессах дробления и измельчения горных пород.

Наиболее точную информацию о внутренней структуре и фазовом составе образцов геоматериалов дают рентгеновская дифрактометрия и томография [1–6]. Однако сложность и продолжительность процедур исследования приводит к необходимости развития и совершенствования других методов неразрушающего контроля. Одним из таких методов является широкополосная акустическая спектроскопия с лазерными источниками ультразвука [7–9]. Лазерная оптоакустика основана на возбуждении широкополосных акустических сигналов импульсным лазерным излучением и их детектировании с высоким временным разрешением [7–9]. В этом случае информацию о процессе взаимодействия излучения с веществом несет как амплитуда возбуждаемого сигнала, так и его временной профиль.

В настоящей работе проведено численное моделирование спектров ультразвуковых сигналов, возбуждаемых в оптико-акустических генераторах, выполненных из различного материала, а также исследовано влияние на вышеперечисленные характеристики дифракции и затухания в горных породах.

Теоретические оценки спектров оптико-акустических сигналов

На первом этапе исследований были выполнены оценки необходимых параметров возбуждаемых ультразвуковых импульсов продольных волн для определения размеров зерен и микротрещин. Известно, что амплитуда зондирующего импульса зависит от характеристик оптико-акустического генератора (среды, в приповерхностном слое которой происходит поглощение оптического излучения и возбуждение упругих волн) и лазерного импульса. В общем случае амплитудный спектр $S(f)$ зондирующих импульсов равен произведению передаточных функций оптико-акустического генератора $K_1(f)$ и огибающей интенсивности лазерного импульса $K_2(f)$:

$$S(f) = K_1(f) \times K_2(f), \quad K_1(f) = \left(1 + \frac{4\pi^2 f^2}{\mu^2 C^2} \right)^{-1} \quad (1)$$

где f – частота, μ – коэффициент поглощения света в материале генератора, C – скорость распространения продольных волн в нем. При использовании стандартного лазера с фиксированной наносекундной длительностью импульса при одномодовой генерации передаточная функция временной огибающей лазерного импульса и распределение интенсивности по поперечному сечению строго определены и имеют гауссов вид: $K_2(f) = \exp(-\pi^2 f^2 \tau_0^2)$, τ_0 – длительность лазерного импульса. Показано, что в данных генераторах в отличие от пьезоэлектрических источников достигается гауссово распределение амплитуды по поперечному сечению акустического пучка, что приводит к отсутствию боковых лепестков в диаграмме направленности излучателя и резкому уменьшению уровня шумов, с одной стороны, и простому учету влияния дифракции при распространении данного ультразвукового импульса в исследуемом образце. Управление параметрами импульса возможно за счет выбора материала оптико-акустического генератора. Поскольку характерные масштабы неоднородностей в образцах геоматериалов изменяются в широких пределах: от 0,05–0,10 мм для мелкозернистых пород до 10–20 мм для крупнозернистых пород, то частотный диапазон должен составлять, по крайней мере, 250 кГц – 100 МГц. В этом случае генерацию высокочастотной части спектра возбуждаемых сигналов можно обеспечить за счет резкого нарастания переднего фронта по экспоненциальному закону с показателем экспоненты, равным произведению коэффициента поглощения μ на скорость распространения продольной вол-

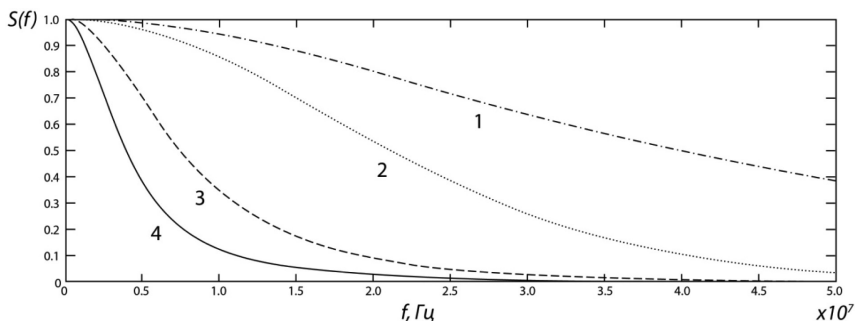


Рис. 1. Спектры широкополосных акустических сигналов для оптико-акустических генераторов, выполненных из различных материалов (различные μC) и при различных длительностях лазерного импульса τ_0 : 1 – $\mu C = 2,5 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$, $\tau_0 = 10^{-10} \text{ c}$; 2 – $\mu C = 2,5 \times 10^8 \text{ c}^{-1}$, $\tau_0 = 10^{-8} \text{ c}$; 3 – $\mu C = 5 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$, $\tau_0 = 10^{-8} \text{ c}$; 4 – $\mu C = 2,5 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$, $\tau_0 = 10^{-8} \text{ c}$

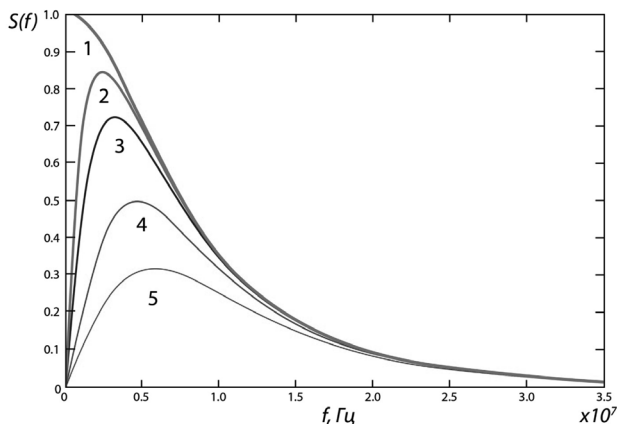


Рис. 2. Спектры широкополосных акустических сигналов для оптико-акустических генераторов при $\mu C = 5 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$, $\tau_0 = 10^{-8} \text{ c}$ с учетом дифракции при различных z : 1 – $z = 0 \text{ мм}$; 2 – $z = 1 \text{ мм}$; 3 – $z = 2 \text{ мм}$; 4 – $z = 5 \text{ мм}$; 5 – $z = 10 \text{ мм}$

ны C в материале оптико-акустического преобразователя. Спад данного импульса определяет низкочастотную часть спектра. Результаты моделирования спектров упругих волн, возбуждаемых в оптико-акустических генераторах из разных материалов, приведены на рис. 1. Показано, что в зависимости от материала преобразователя спектр может простирается от 100 кГц до 100 МГц.

При распространении упругих волн в образцах геоматериалов амплитуда ультразвука уменьшается с увеличением расстояния от источника за счет дифракции, рассеяния и поглощения. Наиболее просто учитывается влияние дифракции. Если распределение давления p на поверхности оптико-акустического генератора гауссово $p = p_0 \exp(-r^2 / a^2)$, где p_0 – амплитуда давления на оси оптико-акустического преобразователя, r – поперечная координата, a – ширина акустического пучка, то при распространении волны вглубь образца (вдоль координаты z) для каждой гармоники широкополосного сигнала можно записать:

$$p = \frac{p_0}{\sqrt{1 + D^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{a^2(1 + D^2)}\right), \quad (2)$$

где $D = Cz / (\pi a^2 f)$. Влияние дифракции при распространении таких импульсов в однородной среде приводит к обеднению амплитудного спектра низкими частотами (рис. 2).

Учет влияния затухания при распространении ультразвуковых импульсов был проведен на основании работ [10–12], в ко-

торых предполагалось, что коэффициент затухания α состоит из двух частей: первая связана с поглощением ультразвука в среде α_{abs} , вторая часть определяется рассеянием на неоднородностях геоматериала. Коэффициент поглощения α_{abs} для скальных пород прямо пропорционален частоте f в диапазоне от 100 кГц до 30 МГц и может быть представлен в виде: $\alpha_{\text{abs}} = \beta f$, где коэффициент β , определяется свойствами геоматериала. Неоднородность среды приводит к изменению ее акустического импеданса (равного произведению плотности ρ на скорость распространения C упругих волн), обусловленного включением посторонних тел (зерен, пор, наличием границ зерен), а также их размерами. Поскольку в геоматериалах наблюдается большой разброс характерных размеров зерен (по крайней мере, на три порядка), то в работах [6] при расчете коэффициента рассеяния для функции распределения диаметров частиц геосреды был использован логарифмически-нормальный закон. Было получено, что в частотной зависимости коэффициента рассеяния необходимо выделить три области в зависимости от соотношения между размерами неоднородностей и длинами волн [6, 7].

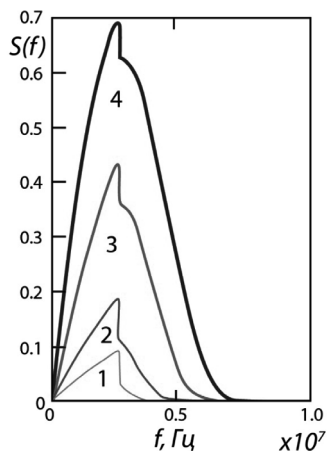


Рис. 3 Спектры широкополосных акустических сигналов для оптико-акустических генераторов при $\mu C = 5 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$, $\tau_0 = 10^{-8} \text{ с}$ и различных z с учетом дифракции и рассеяния на зернах геоматериала с характерными масштабами 0,5–1 мм: 1 – $z = 1 \text{ мм}$; 2 – $z = 2 \text{ мм}$; 3 – $z = 5 \text{ мм}$; 4 – $z = 10 \text{ мм}$

В первой области, когда характерный размер зерна D намного меньше длины волны λ ($\lambda \gg D$, область низких частот, рэлеевское рассеяние) $\alpha_r = \beta_r D^3 f^4$ (β_r – константа, определяемая непосредственно материалом). Если длина волны сравнима с характерным размером неоднородности ($\lambda \approx D$, область средних частот и, так называемого, стохастического или фазового рассеяния), то наблюдается квадратичная зависимость коэффициента затухания от частоты и линейная от характерного размера рассеивателя: $\alpha_p = \beta_p D f^2$. Наконец, в третьей области ($\lambda \ll D$, область диффузного рассеяния) коэффициент рассеяния перестает зависеть от частоты: $\alpha_d = \beta_d / D$. Представляя зависимость α_d / f^2 от квадрата частоты и фиксируя частоты, соответствующие переходам от одной области к другой,

можно оценить характерные масштабы рассеивателей: максимальный, минимальный и средний. На рис. 3 приведены рассчитанные амплитудные спектры ультразвуковых импульсов, прошедших через образцы мрамора различной толщины, в котором большая часть характерных размеров зерен лежит в диапазоне 500 мкм – 1 мм.

Заключение

Приведенные оценки показали, что при распространении широкополосных ультразвуковых импульсов в геоматериале необходимо учитывать влияние на их форму и спектр дифракции, поглощения и рассеяния. Измеряя амплитудные спектры исходного и прошедшего через образец сигнала, возможно определить характерные размеры зерен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lingtao Mao, Jianping Zuo, Zexun Yuan, Fu-Pen Chiang*. Full-field mapping of internal strain distribution in red sand stones specimen under compression using digital volumetric speckle photography and X-ray computed tomography // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2015, v. 7, P. 136–146.

2. *Adam J., Schreurs G., Kinkmuller M., Wieneke M.* 2D/3D strain localization and fault simulation in analogue experiments: insights from X-ray computed tomography and tomographic image correlation // *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2008, 49 (Supp.2):21–2.

3. *Haskin L. A. et al.* Raman spectroscopy for mineral identification and quantification for in situ planetary surface analysis: A point count method. *Journal of Geophysical Research* 102:19293, 2007.

4. *Ying G.* Automated scanning electron microscope based mineral liberation analysis, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* 2:33-41, 2003.

5. *Bruyndonckx P. et al.* Progress in development of a laboratory micro-XRF-microCT system. *Proceedings of SPIE: Developments in X-ray Tomography VII*:7804–7845, 2010.

6. *Mutina A., Koroteev D., Using D.* X-Ray microtomography for the 3D mapping of minerals. *Microscopy and Analysis*, 26(2), March 2012.

7. *Симонова В. А., Саватеева Е. В., Карабутов А. А., Карабутов А. А. (мл.), Каптильный А. Г., Ксенофонтов Д. М., Подымова Н. Б.* Оптико-акустическая и лазерная ультразвуковая диагностика и дефектоскопия // *Вестник РФФИ*. – 2012. – № 3 (83). – С. 10–20.

8. *Karabutov A. A., Podymova N. B., Cherepetskaya E. B., Makarov V. A., Sokolovskaya Yu. G.* Laser-Ultrasonic Method for Measuring the Local Elastic Moduli of Porous Isotropic Composite Materials // *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, v. 9, № 10, P. 1168–1171.

9. *Burov V. A., Darialashvili P. I., Evtukhov S. N., Rummyantseva O. D.* New informative possibilities of active-passive thermoacoustic tomography // *Acoust. Imaging*. Ed. W.Arnold and S. Hirsekorn, 2004, v. 27, P. 305–313.

10. *Stanke F. E., Kino G. S.* A unified theory for elastic wave propagation in polycrystalline materials. // J. Acoust. Soc. Am., 1984, V. 75, P. 234–238.

11. *Goebbels K., Hirsek S.* A new ultrasonic method for stress determination in textured materials // NDT International, Volume 17, Issue 6, December 1984, P. 337–341.

12. *Dascha Dobrovolskij, Sigrun Hirsekorn, Martin Spies.* Simulation of Ultrasonic Materials Evaluation Experiments Including Scattering Phenomena due to Polycrystalline Microstructure // Physics Procedia 70:644–647. December 2015. **PLAE**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Эртуганова Эльмира Александровна*¹ – кандидат технических наук, доцент,

*Винников Владимир Александрович*¹ – доктор физико-математических наук, зав. кафедрой, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com,

*Шибаетов Иван Александрович*¹ – горный инженер,

*Павлов Илья Александрович*¹ – студент,

¹ МГИ НИТУ «МИСИС».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 2, pp. 384–391.

UDC 552.1

E.A. Ertuganova, V.A. Vinnikov, I.A. Shibaev, I.A. Pavlov

STUDY OF STRUCTURAL FEATURES OF ROCKS BASED ON SPECTRAL CHARACTERISTICS OF BROADBAND ULTRASOUND SIGNALS PASSED THROUGH GEOMATERIAL

A brief overview of non-destructive methods of obtaining information about the internal structure and phase composition of samples of geomaterials is given. Special attention is paid to optical-acoustic methods. Theoretical estimates of the spectra of optical-acoustic signal have been made. Necessary for studies of rock samples frequency range was defined. The estimates of necessary parameters of the excited longitudinal waves of ultrasonic pulses to determine the grain size and microcracks were made. The possibility of controlling the pulse parameters by choosing opto-acoustic generator material was shown. Generation of high-frequency part of the spectrum of the excited signal can be provided by the sharp rise of the leading edge exponentially with an exponent equal to the product of the absorption coefficient on the velocity of propagation of longitudinal waves in optical-acoustic transducer material. The decline of this pulse determines the low-frequency part of the spectrum. The influence on the spectral characteristics of the diffraction and scattering at inhomogeneities geomedium was made. The spectra of the broadband acoustic signals to opto-acoustic generators made of different materials, with different laser pulse durations, as well as the diffraction and scattering were obtained. Features of the change of the spectra of scattering in dependence on the characteristic scales of grains (Rayleigh, stochastic and diffuse scattering). It has been shown that fixing the frequency corresponding to transitions from one area to another, it is possible to estimate the characteristic scale of scatterers: the maximum, minimum and average. Thus, by measuring the amplitude spectra of the source signal and transmitted through the sample, it is possible to determine the characteristic size of the grains.

Key words: internal structure, phase composition of samples; amplitude spectra of optical-acoustic signal; opto-acoustic generator; frequency dependence of scattering coefficient; characteristic scales of grains.

AUTHORS

Ertuganova E.A.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Vinnikov V.A.¹, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Head of Chair, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com,
Shibaev I.A.¹, Mining Engineer,
Pavlov I.A.¹, Student,
¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study has been supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 161710181.

REFERENCES

1. Lingtao Mao, Jianping Zuo, Zexun Yuan, Fu-Pen Chiang. Full-field mapping of internal strain distribution in red sand stones specimen under compression using digital volumetric speckle photography and X-ray computed tomography. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2015, v. 7, P. 136–146.
2. Adam J., Schreurs G., Kinkmuller M., Wieneke M. 2D/3D strain localization and fault simulation in analogue experiments: insights from X-ray computed tomography and tomographic image correlation. *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2008, 49 (Supp.2):21–2.
3. Haskin L.A. Raman spectroscopy for mineral identification and quantification for in situ planetary surface analysis: A point count method. *Journal of Geophysical Research* 102:19293, 2007.
4. Ying G. Automated scanning electron microscope based mineral liberation analysis, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* 2:33–41, 2003.
5. Bruyndonckx P. et al. Progress in development of a laboratory microXRF-microCT system. *Proceedings of SPIE: Developments in X-ray Tomography VII*:7804–7845, 2010.
6. Mutina A., Koroteev D., Using D. X-Ray microtomography for the 3D mapping of minerals. *Microscopy and Analysis*, 26(2), March 2012.
7. Simonova V.A., Savateeva E.V., Karabutov A.A., Karabutov A.A. (ml.), Kaptil'nyy A.G., Ksenofontov D.M., Podymova N.B. *Vestnik Rossiyskogo fonda fundamental'nykh issledovaniy*, 2012, no 3 (83), pp. 10–20.
8. Karabutov A.A., Podymova N.B., Cherepetskaya E.B., Makarov V.A., Sokolovskaya Yu. G. Laser-Ultrasonic Method for Measuring the Local Elastic Moduli of Porous Isotropic Composite Materials. *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, v. 9, № 10, P. 1168–1171.
9. Burov V.A., Darialashvili P.I., Evtukhov S.N., Rummyantseva O.D. New informative possibilities of active-passive thermoacoustic tomography. *Acoust. Imaging*. Ed. W.Arnold and S. Hirsekorn, 2004, v. 27, P. 305–313.
10. Stanke F.E., Kino G.S. A unified theory for elastic wave propagation in polycrystalline materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1984, V. 75, P. 234–238.
11. Goebbels K., Hirsek S. A new ultrasonic method for stress determination in textured materials. *NDT International*, Volume 17, Issue 6, December 1984, P. 337–341.
12. Dascha Dobrovolskij, Sigrun Hirsekorn, Martin Spies. Simulation of Ultrasonic Materials Evaluation Experiments Including Scattering Phenomena due to Polycrystalline Microstructure. *Physics Procedia* 70:644–647. December 2015.