

УДК 534.2, 622.02

## О ПРИЧИНАХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ ПОРОД. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НА ОБРАЗЦАХ БИОТИТОВЫХ ГНЕЙСОВ

© 2016 г. И.Ю. Зель<sup>1,2</sup>, Т. И. Иванкина<sup>1</sup>, Т. Локаичек<sup>3</sup>, Х. Керн<sup>4</sup>, Д. М. Левин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

<sup>2</sup> Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт Чешской Академии наук, г. Прага, Чешская Республика

<sup>4</sup> Институт наук о Земле, Кильский университет, г. Киль, Германия

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований на сильно анизотропном образце плагиоклаз-биотитового гнейса, структура которого обладает композиционной слоистостью, и на образце биотитового гнейса со слабой анизотропией. Использовались два метода акустических измерений сейсмической анизотропии – измерения лучевых скоростей продольных волн на сферическом образце и взаимодополняющие измерения фазовых скоростей продольных и поперечных волн на кубическом образце при разных всесторонних давлениях. Данные совместных ультразвуковых измерений были использованы для восстановления значений упругих модулей объемных образцов.

Кристаллографические текстуры основных породообразующих минералов исследуемых образцов определялись методом нейтронной дифракции. На основе текстурных данных проведено теоретическое моделирование упругих свойств с использованием различных методов усреднения и теории эффективных свойств микронеоднородной среды.

Авторами впервые применена нелинейная аппроксимация зависимости экспериментально измеренных скоростей продольных волн от всестороннего давления для оценки упругих свойств минерального скелета и преимущественной ориентации плоских микротрещин в объеме образцов. Теоретические расчеты позволили установить, что основными причинами возникновения упругой анизотропии образцов являются преимущественные ориентировки минералов слюды и микротрещин.

Сравнение результатов теоретического моделирования и ультразвуковых измерений показало существенные различия в значениях скоростей поперечных волн.

**Ключевые слова:** биотитовый гнейс, скорости упругих волн, кристаллографическая текстура, слоистость, сейсмическая анизотропия.

### Литература

- Александров К.С., Продайвода Г.Т. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2000. 354 с.
- Баюк И.О., Рыжков В.И. Определение параметров трещин и пор карбонатных коллекторов по данным волнового акустического каротажа // Технологии сейсморазведки. 2010. № 3. С.32–42.
- Зель И.Ю., Иванкина Т.И., Левин Д.М., Локаичек Т. Применение модифицированного метода ультразвуковых измерений для определения упругих модулей горных пород // Кристаллография. 2015. Т. 60, № 4. С.537–545.
- Зель И.Ю., Иванкина Т.И., Левин Д.М., Локаичек Т. Лучевые скорости Р-волн и обратная задача акустики применительно к анизотропным средам // Кристаллография. 2016. Т. 61, № 4. С.599–605.

- Иванкина Т.И., Маттис З.* О развитии количественного текстурного анализа и применении его в решении задач наук о Земле // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* 2015. Т. 46, вып. 3. С.366–423.
- Шермергор Т.Д.* Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
- Babuska V., Cara M.* Seismic Anisotropy in the Earth. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991. 219 p.
- Backus G.E.* Long-wave elastic anisotropy reduced by horizontal layering // *J. Geophys. Res.* 1962. V. 67. P.4427–4440.
- Bass J.D.* Elasticity of Minerals, Glasses, and Melts // *Mineral Physics and Crystallography: A Handbook of Physical Constants* / Ed. T.J. Ahrens. AGU Ref. Shelf. 1995. V. 2. AGU. Washington D.C. P.45–63. doi: 10.1029/RF002p0045.
- Birch F.* The velocity of compressional wave velocities in rocks to 10 kbar // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66. P.2199–2224.
- Crampin S.* A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic-media // *Wave motion.* 1981. V. 3. P.341–391.
- Keppler R., Ullemeyer K., Behrmann J.H., Stipp M.* Potential of full pattern fit methods for the texture analysis of geological materials: implications from texture measurements at the recently upgraded neutron time-of-flight diffractometer SKAT // *J. Appl. Crystallography.* 2014. V. 47. P.1520–1534.
- Kern H.* P- and S-wave velocities in crustal and mantle rocks under the simultaneous action of high confining pressure and high temperature and the effect of the rock microstructure // *High-Pressure Researchers in Geoscience* / Ed. W.Schreyer. Stuttgart: Schweizerhartsche Verlagsbuchhandlung, 1982. P.15–45.
- Kern H., Ivankina T.I., Nikitin A.N., Lokajicek T., Pros Z.* The effect of oriented microcracks and crystallographic and shape preferred orientation on bulk elastic anisotropy of a foliated biotite gneiss from Outokumpu // *Tectonophysics.* 2008. V. 457. P.143–149.
- Kern H., Mengel K., Strauss K.W., Ivankina T.I., Nikitin A.N., Kukkonen I.T.* Elastic wave velocities, chemistry and modal mineralogy of crustal rocks sampled by the Outokumpu scientific drill hole: Evidence from lab measurements and modeling // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 2009. V. 175. P.151–166.
- Kichanov S.E., Kozlenko D.P., Ivankina T.I., Rutkauskas A.V., Savenko B.N.* The neutron imaging and tomography studies of deep-seated rocks from the Kola superdeep borehole // *Physics Procedia.* 2015. V. 69. P.537–541.
- Lobanov K.V., Kazansky V.I., Kusnetsov A.V., Zharikov A.V., Nikitin A.N., Ivankina T.I., Zamyatina N.V.* Correlation of Archean rocks from the Kola superdeep borehole and their analogues from the surface: evidence from structural – petrological, petrophysical and neutron diffraction data // *Petrology.* 2002. V. 10, N 1. P.23–38.
- Lokajicek T., Svitek T.* Laboratory measurement of elastic anisotropy on spherical rock samples by longitudinal and transverse sounding under confining pressure // *Ultrasonics.* 2015. V. 56. P.294–302.
- Melia P.J., Carlson R.L.* An experimental test of P-wave anisotropy in stratified media // *Geophysics.* 1984. V. 49. P.364–378.
- Schoenberg M., Muir F.* A calculus for finely layered anisotropic media // *Geophysics.* 1989. V. 54, N 5. P.581–589.
- Vasin R.N., Wenk H.-R., Kanitpanyacharoen W., Matthies S., Wirth R.* Elastic anisotropy modeling of Kimmeridge shale // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2013. V. 118. P.1–26.