ВЫЯВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ УПРУГОЙ СИММЕТРИИ В ОБРАЗЦАХ АНИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

В. Л. Ильченко

Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты
vadim@geoksc.apatity.ru

Методом рентгеновской томографии исследованы два образца песчаников, ранее изученных методом акустопольярископии с определением типа упругой симметрии и пространственного положения элементов упругой симметрии пород. Сравнение результатов исследования показало пространственное совпадение ранее установленных элементов упругой симметрии с системной организацией неоднородностей (текстура, пористость, микротрещиноватость), которые легко визуализируются на рентгеновских томограммах.

Ключевые слова: рентгеновская томография, акустопольярископия, упругая анизотропия пород, упругая симметрия.

IDENTIFICATION OF ELASTIC SYMMETRY ELEMENTS IN ANISOTROPIC ROCK SAMPLES BY X-RAY TOMOGRAPHY

V. L. Ilchenko

Geological Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity

Two samples of sandstones were studied by means of X-ray tomography, which had been previously studied by acoustopolariscopic method with determination of spatial position of the elastic symmetry elements and type of elastic symmetry of rocks. Comparison of the obtained results showed the spatial coincidence of previously studied elements of elastic symmetry with the system organization of irregularities (texture, porosity, microfractures), easily visualized on X-ray tomograms.

Keywords: X-ray tomography, acoustopolariscopy, elastic anisotropy of rocks, elastic symmetry.

Введение

Упругая (сейсмическая) анизотропия разного ранга исследуется давно и разными методами, с вариациями используемых частот и длин волн. Признаки упругой анизотропии регионального масштаба (по скорости распространения сдвиговых волн в том числе) отражены в работе Г. В. Егоркина [3]. Для определения упругой анизотропии в образцах малого размера применяют акустопольярископию (акустопольяриметрию) [1] — метод ультразвукового неразрушающего анализа. Общая черта данных работ [1, 3] в том, что пространственные вариации (анизотропия) упругих свойств представляются в виде круговых диаграмм, это удобно для объёмного отражения систем тектонических нарушений.

В последнее время всё чаще появляются работы с использованием метода рентгеновской томографии (РТ) в геологии [7, 8]. Этот вид неразрушающего анализа применяют в разных областях исследований: в нефтяной геологии — для определения коллекторских свойств горных пород [5], в геомеханике и изучении дезинтеграции горных пород [2], микроструктурном анализе и др. [6, 8]. Если РТ позволяет фиксировать пространственное положение систем микротрещин, она может использоваться и для определения упругих параметров (в том числе анизотропии) горных пород.

Цель данной работы — оценить возможности метода рентгеновской томографии (РТ) в установлении прост-

ранственного положения элементов упругой симметрии (и анизотропии) горных пород путем сравнения результатов применения акустопольярископии и РТ к одним и тем же образцам.

Акустопольярископия

Акустопольярископия (акустопольяриметрия) как метод неразрушающего анализа изобретён в 1990 г. для поиска и определения пространственного положения дефектов (трещин) в различных твёрдых средах (натуральных и искусственных). Измерения проводят на образцах кубической формы с длиной ребра 25—45 мм. Для измерений используют ультразвуковой прибор — акустопольярископ (аналог поляризационного микроскопа, где вместо света используют поляризованный ультразвук, частота колебаний 1.25 МГц, длина волны $\lambda = 3$ мм) [1]. Источник ультразвука — серийный дефектоскоп (УД2-12). Измерения проводят: 1 — при скрещённых (ВС), 2 — при параллельных (ВП) векторах поляризации источника и приёмника сигнала в каждом направлении куба, при полном повороте образца с заданным шагом (здесь 10°), фиксируя амплитуду исходящего и принятого сигнала. По итогам измерений строят акустопольяриграммы (рис. 1). Подробности методики и формулы для вычисления опубликованы в 1990-м году [1] и позже [4]. Уникальная рабочая установка для акустопольярископии сейчас есть в Геологическом институте Кольского

Рис. 1. Акустополяриграммы образцов (1а, 1б) песчаника из скважины Ленинградская-1 [4]: жирная чёрная кривая — ВП, серая — ВС; в кружках — направления прозвучивания, в квадратных скобках — номера граней (означают пространственное положение образца), скрещённые прямые линии — элементы упругой симметрии

Fig. 1. Acoustopolarigrams of samples (1a, 1b) of sandstone from the Leningradsкая-1 well [4]: a fat black curve — VP, gray — VS; In circles, the directions of sounding, in square brackets — the numbers of faces (mean the spatial position of the sample), crossed straight lines — elements of elastic symmetry

НЦ РАН (г. Апатиты, Мурманская обл.). От других установок для ультразвукового изучения горных пород, применяемых, например, в МГУ и ИГЕМ РАН, в акустополярикопе используются плоскополяризованные поперечные волны, позволяющие определять пространственное положение элементов упругой симметрии образцов (означающее в пространстве систему микротрещин).

Результаты акустополярископии

Для сравнительного анализа акустополярископии и рентгеновской томографии были использованы результаты работы по исследованию плотностных и упругих свойств (анизотропии) образцов керна из шельфовых отложений Карского моря (Ленинградская площадь), содержащих уникальные по запасам месторождения газа и газоконденсата [4]. На рисунке 1 представлены результаты акустополярископии двух образцов аркозовых песчаников (1а, 1б) кубической формы с длиной ребра ≈ 30 мм.

Петрографическое описание образцов (в шлифах). Образец 1а: аркозовый песчаник с глауконитом, цвет зеленовато-серый, массивный, мелкозернистый, хорошо сортированный, зерна плохо окатаны, цемент пленочный глинистого состава с железнением (не $> 5\%$ объема). Минеральный состав обломков: кварц — 70% объема породы и полевой шпат — 30% объема, размер зёрен — $0.11\text{--}0.18$ мм. Образец 1б: аркозовый песчаник с глауконитом (зерна $0.15\text{--}0.17$ мм, не $> 5\%$ объема), мелкозернистый, цвет желтовато-серый, неяснослоистый, хорошо сортированный, зерна среднеокатаны, цемент пленочный (не $> 5\%$ объема) глинисто-железистого состава. Обломки составляют 90% породы. Минеральный состав обломков: кварц 60% , полевой шпат 40% , отдельные лейсты мусковита, размер зёрен — $0.14\text{--}0.18$ мм.

Приведенные данные [4] показывают, что размер показателя упругой анизотропии (B, A_p) осадочных пород не зависит от плотности и состава; максимальные показатели анизотропии типичны для слоистых сред, понижаются в средах с неявной слоистостью. Низкую плотность (высо-

кую пористость) имеют слоистые песчаники с признаками диссимметрии в форме акустополяриграмм. Элементы упругой симметрии означают пространственное положение основных систем трещиноватости, а их несовпадение с текстурой пород (обр. 1а) предполагает кроме влияния литостатического давления участие бокового динамического воздействия (сдвиг с растяжением или сжатием).

Рентгеновская томография

РТ — метод неразрушающего анализа, используемый для изучения различных твердых тел — метод реконструкции (восстановления) и визуализации пространственного распределения величины линейного коэффициента ослабления (ЛКО) рентгеновского излучения в плоском слое исследуемого объекта в результате компьютерной математической обработки серии теневых проекций. Производительность метода РТ определяется конструкцией прибора и заданными параметрами сканирования, в т. ч. размером пикселя, шагом сканирования, усреднением по кадрам и др., которые задаются в соответствии со сложностью поставленной задачи. После компьютерной обработки по результатам томографии получают информацию о неоднородности и плотностных свойствах исследуемого объекта (как по всему объёму, так и в отдельных срезах). Структура порового пространства определяется системами трещин (микротрещин), которые определяют положение элементов упругой симметрии горных пород в акустополярикопии.

Результаты РТ

Сканирование проведено на микротомографе Skyscan-1172 (Bruker-microCT, Бельгия) в ресурсном центре «Геомодель» СПбГУ. Параметры сканирования: напряжение 100 кВ , ток 100 мкА , фильтр — $\text{Al}+\text{Cu}$, размер пикселя — 4.28 мкм , шаг вращения — 0.200 град., усреднение по кадрам — 4. Время сканирования ≈ 2.5 часа.

Измерения проведены на образцах кубической формы с длиной ребра ≈ 10 мм (1а, 1б), выпиленных из одно-

имённых кубиков, измеренных методом акустополарископии с сохранением ориентировки граней.

В результате томографического исследования (рис. 2) установлено расположение пор (черные точки) и присутствие сульфидов, скорее всего пирита (белые точки). Разная их концентрация объясняет разницу в плотности образцов 1а и 1б (см. таблицу). Все элементы упругой симметрии, нанесённые на акустополариграммах, на томограммах (направления 1 и 2) легко определяются (примерно на тех же местах и под теми же углами). Их местоположение совпадает со структурно-текстурными особенностями образцов (слоистостью и системой порового пространства — микротрещинами). На грани 3 элементы упругой симметрии четко не проявляются, что устраняется повторным сканированием образца с его вращением вокруг оси 1-1 или 2-2.

Заключение

В результате сравнения данных, полученных методами акустополарископии и рентгеновской томографии (рис. 1, 2), показана возможность использования метода РТ для определения пространственного положения элементов упругой симметрии в образцах горных пород. Преимущество РТ помимо визуализации структурных неоднородностей исследуемого объекта и возможности получения трехмерного изображения состоит также в доступности метода для массового использования, т. к. необходимое оборудование для этих исследований сейчас есть в любом крупном научном центре коллективного пользования.

Работа выполнена с использованием оборудования ресурсного центра «Геомодель» научного парка Санкт-Петербургского государственного университета.

Рис. 2. Результаты томографии: элементы упругой симметрии нанесены на гранях 1 и 2 прямыми белыми линиями

Fig. 2. Results of microtomography: elements of elastic symmetry are plotted on faces 1 and 2 by straight white lines

Некоторые физические свойства песчаников (по [4])

Some physical features of sandstones (from [4])

№ образца Sample No.	Глубина, м Depth, m	Название породы Rocks	Квазиматрица скоростей, V_{ij} (км/с) Velocity quasimatrix	A/B, %	Плотность, г/см ³ Density	Углы α / Ψ , град. Angles, deg	*Тип упр. симм. Type of el. symm
1b	1701	Песчаник аркозовый, неяснослоистый Arcose, indistinctly laminated sandstone	1.934 1.304 1.346 1.453 2.183 1.378 1.271 1.279 1.798	<u>14.00</u> 6.20	1.99	<u>0</u> 0	T
1a	1873	Песчаник аркозовый, массивный Arcose, massive sandstone	2.651 1.780 1.758 1.784 2.685 1.479 1.477 1.506 0.955	<u>66.71</u> 18.43	2.32	<u>11</u> 20	T

*Тип упругой симметрии: Т — трансверсально-изотропный (псевдогексагональный).

*Type of elastic symmetry: T — transversal-isotropic (pseudo-hexagonal).

Литература

1. *Акустополариметрия* и определение упругой симметрии горных пород: Метод. реком. / Сост.: Ф. Ф. Горбачевич, В. В. Балаганский, Н. Г. Иванова; отв. редактор Н. В. Шаров. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1990. 84 с.
2. Вайсберг Л. А., Каменева Е. Е. Возможности компьютерной рентгеновской микротомографии при исследовании физико-механических свойств горных пород // Горный журнал. 2014. № 9. С. 85—90.
3. Егоркина Г. В. Трещиноватость верхней части земной коры по данным сейсмических исследований // Геотектоника. 1987. № 4. С. 115—121.
4. Ильченко В. Л., Чикирёв И. В. О некоторых физических свойствах меловых пород юго-западной части шельфа Карского моря // Литология и полезные ископаемые. 2009. № 4. С. 363—373.
5. Кривощёков С. Н., Кочнев А. А. Опыт применения рентгеновской компьютерной томографии для изучения свойств горных пород // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. № 6. С. 32—42.
6. Якушина О. А., Ожогина Е. Г., Хозяинов М. С. Рентгеновская вычислительная микротомография — неразрушающий метод структурного и фазового анализа // Мир измерений. 2003. № 10. С. 12—17.
7. Якушина О. А., Хозяинов М. С. Анализ возможностей рентгеновской томографии для петрофизических исследований керна нефтегазовых скважин // Каротажник. 2014. Т. 236. № 2. С. 107—121.
8. Veerle C., Boone M. High-resolution X-ray CT in geosciences: a review of the current technology and applications // Earth-Science Reviews. Elsevier. 2013. V. 123. P. 1—17.
9. F. F. Gorbatshevich, V. V. Balaganskii, N. G. Ivanova. Ed. N. V. Sharov. Apatity, 1990, KSC RAS, 84 pp.
10. Vaisberg L. A., Kameneva E. E. *Vozможности kompyuternoi rentgenovskoi mikrotomografii pri issledovanii fiziko-mekhanicheskikh svoystv gornyh porod* (Possibilities of computer microtomography at researches of physical and mechanical features of rocks). Gornyi zhurnal, 2014, No. 9, pp. 85—90.
11. Egorkina G. V. *Treschinovatost verkhnei chasti zemnoi kory po dannym seismicheskikh issledovaniy* (Fractionation of upper part of earth crust according to seismic researches). Geotektonika, 1987, No. 4, pp. 115—121.
12. Ilchenko V. L., Chikirev I. V. *O nekotorykh fizicheskikh svoystvakh melovykh porod yugo-zapadnoi chasti shelfa Karskogo moray* (Some physical features of Cretaceous rocks of southwestern part of Kara shelf). Litologiya i poleznye iskopaemye. 2009, No. 4, pp. 363—373.
13. Krivoschekov S. N., Kochnev A. A. *Opyt primeneniya rentgenovskoi kompyuternoi tomografii dlya izucheniya svoystv gornyh porod* (Experience of usage of x-ray computer tomography to study features of rocks). Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo. 2013, No. 6, pp. 32—42.
14. Yakushina O. A., Ozhogina E. G., Hozyainov M. S. *Rentgenovskaya vychislitelnaya mikrotomografiya — nerazrushayushchii metod strukturnogo i fazovogo analiza* (X-ray computer microtomography — non-destructing method of structural and phase analysis). Mir izmerenii. 2003, No. 10, pp. 12—17.
15. Yakushina O. A., Hozyainov M. S. *Analiz vozmozhnostei rentgenovskoi tomografii dlya petrofizicheskikh issledovaniy kerna neftegazovykh skvazhin* (Analysis of possibilities of x-ray tomography for petrophysical researches of oil borehole cores). Karotazhnik, 2014, V. 236, No. 2, pp. 107—121.
16. Veerle C., Boone M. High-resolution X-ray ST in geosciences: a review of the current technology and applications. Earth-Science Reviews. Elsevier, 2013, V. 123, pp. 1—17.

References

1. *Akustopolaryimetriya i opredelenie uprugoi simmetrii gornyh porod. (Metodicheskie rekomendatsii)* (Acoustic polarimetry and determination of elastic symmetry of rocks (Methodical recom-