Упруго-анизотропные свойства пород разного вещественного состава и фаций метаморфизма северо–востока Балтийского щита

О. М. Тришина,* Ф. Ф. Горбацевич, М. В. Ковалевский
Геологический институт Кольского научного центра РАН
Россия, 184209 Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14
(Статья поступила 29.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

На примере пород, слагающих свиту матерт Печенгского комплекса, изучены геологические особенности, метаморфизм и физические свойства пород от пренит–пумпеллиитовой до амфиболитовой фации. Методом акустополярископии выполнена оценка упругой анизотропии, проведены экспериментальные определения плотности, скорости продольных и поперечных волн в лабораторных условиях. По минеральному составу выполнен расчет плотности и скоростных характеристик для глубинных условий залегания пород. Изучение пород разных фаций метаморфизма показало, что параметры физических свойств *in situ* возрастают от пренит–пумпеллиитовой до амфиболитовой фации.

PACS: 07.64.+z, 62.20.F УДК: 550.8, 552.4
Ключевые слова: метаморфизм, породы, свойства, плотности, скорости продольных и поперечных волн.

ВВЕДЕНИЕ

Породы свиты матерт расположены в пределах нескольких метаморфических зон, от пренит–пумпеллиитовой в центре структуры до амфиболитовой в ее южной и юго-западной частях [1]. В соответствии с этим каменный материал для исследований отбирался из метаморфизованных диабазов и пространственно ассоциирующих с ними тел габбро и габбро-диабазов.

Участок Соукерйоки. В районе верхнего течения р. Соукерйоки, расположенном в северной части Печенгской структуры, обследованы метавулканиты, представленные в основном породами базальтового состава: диабазами, шаровыми лавами, лаво- и туфобрекчиями, туфами. Текстура вулканитов сланцеватая или массивная, к главным породообразующим минералам относятся (в %) альбит (40–43), актинолит (14–18), диопсид (16–20), второстепенные и акцессорные: биотит, часто хлоритизированный, ильменит, ортоклаз, апатит, серпентин, кварц, карбонат. Породы метаморфизованы в условиях пренит–пумпеллиитовой фации ($T = 220 - 310°$C, $P = 2.8 - 4.9$ кбар) [1].

Участки Тульявр и Шуони. Породы зеленосланцевой фации изучены в районе оз. Тульявр и среднего течения р. Шуонийоки, расположенных, соответственно, в юго–восточной и западной частях Печенгской структуры. Породы метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации, при $T = 340 - 400°$C и $P = 2.8 - 4.9$ кбар [1]. Структуры метадиабазов гранобластовые, нематогранобластовые, местами аллотриоморфнозернистые. Главные породообразующие минералы пород (в %): плагиоклаз (24–49) , хлорит (14–31), актинолит (1–23), спорадически встречаются кварц, калиевый полевой шпат, эпидот, биотит. Акцессорные минералы представлены апатитом, титанитом, карбонатом, серпентином, ильменитом.

Участок Валасйоки. расположен в юго–восточной части Печенгской структуры. Опробованы породы базальтового состава, представленные сланцеватыми амфиболитами, метаморфизованными в условиях эпидот-амфиболитовой фации, при $T = 420 - 470°$C и $P = 4.9 - 5.4$ кбар [1]. Структуры амфиболитов гранобластовые, лепидогранобластовые. Главные породообразующие минералы (в %): плагиоклаз (41–45), роговая обманка (17–30), эпидот (11–17); второстепенные и акцессорные: кварц, биотит, ильменит, ортоклаз, апатит, серпентин, карбонат.

Участок Кучин–тундра. В районе горы Кучин–тундра породы метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации ($T = 470 - 580°$C, $P = 4.9 - 5.4$ кбар) [1]. Рассланцованные амфиболиты (метадиабазы) представлены мелкозернистыми, равномернозернистыми породами гранонематобластовой структуры. Главные породообразующие минералы: амфибол (содержание $\sim 75 - 80$ % в породе); кварц + полевой шпат — ~ 20%; до 5 % занимают рудные минералы, структуры пород гранонематобластовые, лепидобластовые. Структура метагаббро неравномернозернистая габбровая, пойкилитовая.

1. МЕТОДИКА

Методом Архимеда определили плотность пород. На последующих этапах произведена акустополярископия [2], которая выполняется на образцах в форме куба с ребром 2–3 см. Затем измерены скорости распространения продольных и поперечных колебаний, степень проявления эффекта линейной анизотропии поглощения (ЛААП) D, углы проекций элементов симметрии по отношению к граням образца. Значения скорости распространения продольных и поперечных колебаний представляются в форме матрицы скоростей

*E-mail: trishina@geoksc.apatity.ru

V_{ij} [2]. Следом рассчитываются показатели упругой анизотропии пород по скорости продольных (), и поперечных ($_S$) волн.

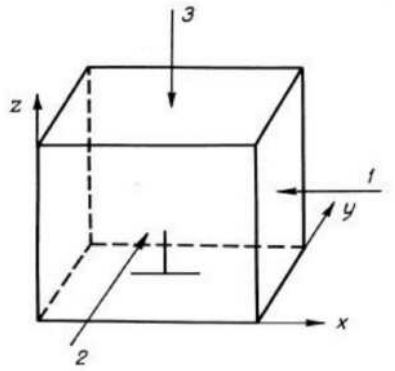

Рис. 1: Индексация образца для акусто–поляризационных измерений

Перед первым этапом измерений плоскости поляризации преобразователей акустополярископа [3] совмещают (положение ВП). Образец устанавливают между преобразователями. В процессе измерений образец поворачивают в пределах угла 360°, при этом измеряется амплитуда сигнала на экране регистрирующего прибора. Перед вторым этапом измерений плоскость поляризации преобразователей скрещивают под углом 90° (положение ВС). Второй этап измерений также проводят в пределах полного угла поворота образца. В результате измерений получают акустополяриграммы, — нормированные круговые диаграммы амплитуды прошедшего через образец ультразвукового импульса. Акустополяриграмма, полученная при параллельных (ВП) векторах поляризации, позволяет судить, например, о наличии эффекта линейной акустической анизотропии поглощения [2] и, соответственно, о преимущественной ориентировке структурных элементов. Акустополяриграмма, полученная при положении ВС, позволяет сделать заключение о наличии и числе проекций элементов симметрии данного образца.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Примеры акустополяриграм пренит–пумпеллиитовой, зеленосланцевой, эпидот–амфиболитовой и амфиболитовой фаций приведены на рис. 2.

Акустополяриграммы ВП образцов пород пренит–пумпеллиитовой и зеленосланцевой фации близки к круговым. Это означает, что породы проявляют малую степень упругой анизотропии. Акустополяриграммы ВП и ВС образцов пород эпидот–амфиболитовой и амфиболитовой фации указывают на более сложную структуру с проявлением упругой анизотропии и эффекта линейной акустической анизотропии поглощения [2].

В таблице представлены сводные результаты изучения петрофизических свойств пород разных фаций метаморфизма. Помимо экспериментально определенных, в ней приведены рассчитанные по минеральному составу средние плотности и скорости распространения продольных и поперечных волн.

Расчеты выполнены по формуле [4]:

$$\ln V_k = \frac{\Sigma \ln V_i P_i}{\Sigma P_i}, \qquad (1)$$

где V_k — средняя расчетная скорость в породе, V_i — средняя скорость в каждом минерале, P_i — доля минерала в породе. По аналогичной формуле рассчитаны плотности тех же образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты изучения физических свойств метаморфических пород: метадиабазов, габбро, габбродиабазов, амфиболитов, метаморфизованные от пренит–пумпеллиитовой до амфиболитовой фации. Эти породы сравнительно часто слагают кристаллические массивы в земной коре. При исследованиях применен новый количественный метод — акустополярископия. Показано, что он позволяет отличать породы разных фаций метаморфизма. Выявлено, что на упругие характеристики пород, как правило, влияют встречающиеся в различных сочетаниях и тепени проявления факторы: неоднородности, микротрещиноватость, упругая анизотропия, эффект линейной акустической анизотропии поглощения.

Изучение физических свойств пород разных фаций метаморфизма показало, что плотность пород возрастает от пренит–пумпеллиитовой до амфиболитовой фации (земная поверхность). Средняя плотность пород пренит–пумпеллиитовой фации практически равна и ниже, чем у пород зеленосланцевой, эпидот–амфиболитовой и амфиболитовой фаций. Плотность пород при глубинных условиях увеличивается от пренит–пумпеллиитовой до амфиболитовой фации. Самые низкие значения скорости продольных колебаний наблюдаются у пород эпидот–амфиболитовой и амфиболитовой фации (земная поверхность). Это, скорее всего, объясняется глубокой структурной перестройкой в процессе метаморфических преобразований, образованием вторичных минералов, таких как слюды и амфибол, которые обладают низкими скоростями в некоторых кристаллографических направлениях и, в том числе, процессами выветривания. Величины скорости продольных колебаний, как и плотность, при глубинных условиях проявляют тенденцию к росту от пренит–пумпеллиитовой до амфиболитовой фации. Такой же характер наблюдается в изменениях скорости распространения поперечных колебаний.

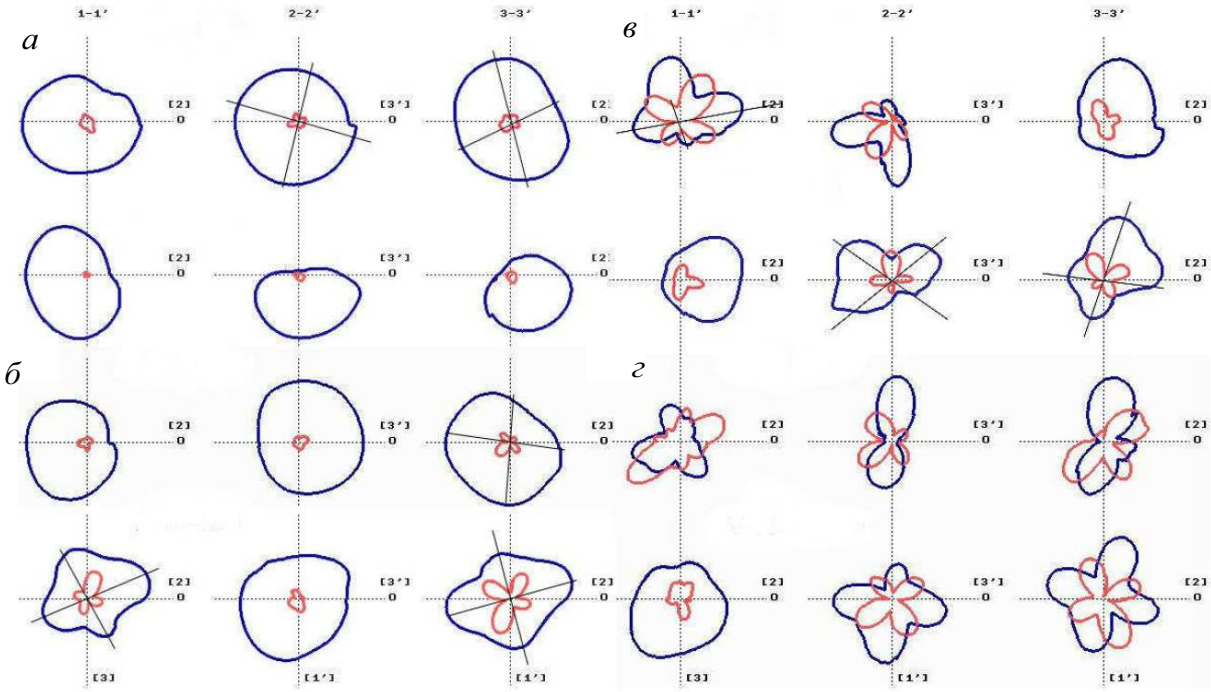

Рис. 2: Примеры акустополяриграм: *а* — пренит–пумпеллиитовая фация (P-13-33-1a, P-13-36-2); *б* — зеленосланцевая фация (P-1311-1, P-13-42-1); *в* — эпидот–амфиболитовая фация (P-13-46-1, P-13-51-1); *г* — амфиболитовая фация (гора Кучин–тундра), V-13-1734, V-13-1744-9

Таблица I: Сводные результаты изучения петрофизических свойств пород разных фаций метаморфизма

Метамор-, физм участок	PT–условия, °C, кбар	К-во образцов	Экспериментальные данные, определенные на образцах в лабораторных условиях			Расчетные данные, определенные по минеральному составу			Коэффициенты анизотропии	
			ρ_R, г/см^3	V_{PR}, км/с	V_{SR}, км/с	ρ_C, г/см^3	V_{PC}, км/с	V_{SC}, км/с	A_P, %	B_S, %
Пренит–пумпеллиитовая фация, р. Соукерйоки	220–310, 2.4–3.2	6	2.83±0.20	6.32±0.39	3.51±0.16	2.96± 0.05	6.29±0.13	3.40±0.08	8.6± 5.4	6.3± 2.6
Зеленосланцевая фация, оз. Тульявр, р. Шуонийоки	340–400, 2.8–4.9	11	2.92±0.07	6.30±0.31	3.51±0.17	2.96±0.05	6.33±0.07	3.44±0.06	8.3±3.5	6.3±2.1
Эпидот-амфиболитовая фация, р. Валасйоки	420–470, 4.9–5.4	6	3.01±0.08	5.13±0.78	3.18±0.19	3.02± 0.03	6.66±0.06	3.69±0.02	3.6±2.1	8.6±4.8
Амфиболитовая фация, г. Кучин–тундра	470–580, 4.9–5.6	9	3.04±0.12	5.73±0.53	3.34±0.35	3.01± 0.17	6.72±0.71	3.79±0.29	8.6±6.3	11.8±8.7

Упругая анизотропия пород пренит–пумпеллиитовой, зеленосланцевой, эпидот–амфиболитовой и амфиболитовой фаций метаморфизма существенно не отличается, что является довольно неожиданным результатом.

Полученные данные (плотности, скоростные характеристики) могут применяться при первичной оценке петрофизических свойств пород в процессе геофизических исследований и технических расчетах в горном деле.

Авторы выражают благодарность канд. геол.-минерал. наук Ветрину В. Р. и РФФИ (грант № 16-05-00026-а), при поддержке которого получена большая часть приведенных в статье результатов.

[1] *Петров В. П.* Метаморфизм раннего протерозоя Балтийского щита. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 1999.
[2] *Горбацевич Ф. Ф.* Акустополярископия горных пород. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 1995.
[3] Авт. свид. СССР № 1281993. Горбацевич Ф. Ф. Акустополяриcкоп для измерения упругости образцов твердых сред.. Бюлл. изобр. № 1. 1987.
[4] *Беликов Б. П., Александров К. С., Рыжова Т. В.* Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М.: Наука. 1970.

Elastic–anisotropic properties of rocks of different composition and metamorphism facies in the northeast of the baltic shield

O. M. Trishina[a], F. F. Gorbatsevich, M. V. Kovalevskiy
Geological Institute of the Kola Science Centre of RAS. Apatity 184209, Russia
E-mail: [a]trishina@geoksc.apatity.ru

Using the rocks composing the Matert Fm of the Pechenga complex as an example, geological features, metamorphism and physical properties of rocks from the prehnite–pumpellyite to the amphibolite facies were studied. The acoustopolariscopy method was used to evaluate elastic anisotropy, experimental determinations of the density, compression and shear wave velocities under laboratory conditions were made. The mineral composition was used to calculate the density and velocity characteristics for deep conditions of the rock occurrence. The study of rocks of different facies of metamorphism showed that the parameters of physical properties *in situ* increase from the prehnite–pumpellyite to the amphibolite facies.

PACS: 07.64.+z, 62.20.F
Keywords: metamorphism, rocks, properties, densities, compression and shear wave velocities.
Received 29 June 2017.

Сведения об авторах

1. Тришина Ольга Михайловна — науч. сотрудник; тел.: (815) 557-9-264, e-mail: trishina@geoksc.apatity.ru.
2. Горбацевич Феликс Феликсович — доктор техн. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (815) 557-96-26, e-mail: gorich@geoksc.apatity.ru.
3. Ковалевский Михаил Васильевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (815) 557-95-81, e-mail: koval@geoksc.apatity.ru.