

УПРУГО-АНИЗОТРОПНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ПЕЧЕНГСКОЙ СТРУКТУРЫ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА (РАЙОН ГОРЫ КУЧИН-ТУНДРА)

© 2017 г. М. В. Ковалевский*, Ф. Ф. Горбацевич*, В. Р. Ветрин*, О. М. Тришина*,
В. Ф. Смолькин**, Е. Н. Фомина*

* Геологический институт Кольского научного центра РАН,
ул. Ферсмана, д.14, оф. 412, г. Апатиты, Мурманская область, 184209 Россия.
E-mail: koval@geoksc.apatity.ru

** Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН,
ул. Моховая, д. 11, стр. 11, г. Москва, 125009 Россия.
E-mail: v.smolkin@sgm.ru

Поступила в редакцию 24.12.2015 г.

После исправления 16.04.2016 г.

В работе приведены результаты экспериментального изучения упруго-анизотропных свойств метаморфических горных пород, преобладающих на юго-восточном фланге Печенгской палеопротерозойской структуры (район горы Кучин-тундра). Породы представлены амфиболитами, полевошпатовыми амфиболитами и метагаббро. Исследования проводились с использованием акустополяризационного метода. Диапазон изменений величин плотности составляет 2.87–3.29 г/см³, скоростей распространения продольных волн – 4.98–6.54 км/с, поперечных – 2.51–3.68 км/с. Выявлены широкие вариации скоростной анизотропии пород, обусловленные изменчивостью состава и степенью их метаморфической переработки. Метод акустополяризации позволяет количественно оценить текстуру породы.

Ключевые слова: горная порода, упругая анизотропия, скорости упругих волн, преобразователи сдвиговых волн, амплитуда, акустополярископ, поляризация.

ВВЕДЕНИЕ

В районе горы Кучин-тундра, расположенной на юго-востоке Печенгской структуры, наблюдается фрагмент центриклинальной структуры, осложненной системой крутопадающих разрывных нарушений. Последние отделяют данную структуру от пород архейского фундамента [16]. Основная часть горы сложена преимущественно вулканогенными породами, которые по своему составу сопоставляются с породами свиты матерта центральной части Северо-Печенгской зоны. В южной стенке горы залегает маломощный горизонт подстилающих “черных сланцев” – туфогенно-осадочных пород, обогащенных сульфидами, – аналог пород ждановской свиты. Породы всех нижележащих свит выклиниваются при подходе с севера к горе Кучин-тундра.

В пределах вулканогенной части разреза расположены массивные лавовые потоки, превращенные в рассланцованные амфиболиты. Судя по химическому составу, они отвечают толеитовым базальтам и ферропикритам. Помимо них отмечаются фрагменты силловых тел офитовых габбро (габбро-диабазов), превращенных в плагиоамфиболиты.

Рассланцованные амфиболиты (метадиабазы) представлены мелкозернистыми, равномернозернистыми породами гранонематобластовой структуры. Наблюдаются признаки катаклаза: рассланцевание, подчеркнутое ориентировкой зерен амфибола. Между зернами амфибола дислоцированы кварц-полевошпатовые мелкозернистые агрегаты. Главные породообразующие минералы (% в объеме): амфибол (75–80), кварц-полевой шпат (20), рудные минералы (до 5).

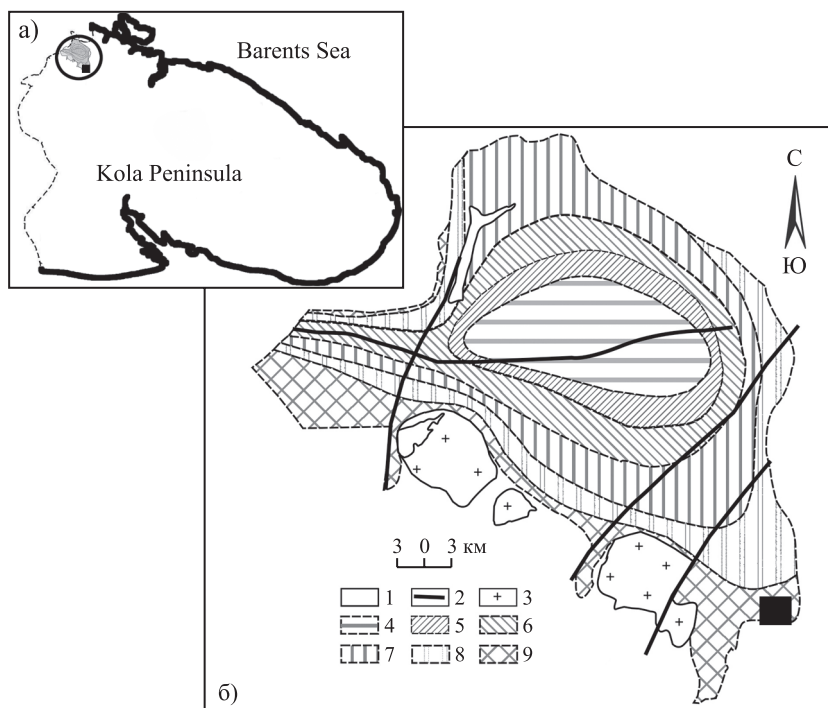


Рис. 1. Юго-восточная часть Печенгской структуры, район отбора образцов обозначен черным квадратом: *a* – общий вид Печенгской структуры, обозначен кругом; *б* – карта метаморфических фаций Печенгской структуры [13, 17]: 1 – породы архейского фундамента, 2 – проекции разломов, 3 – гранитоиды; 4–8 – метаморфические зоны: 4 – пренит-пумпеллиитовая, 5 – пренит-актинолитовая; 6–7 – зеленосланцевые субфации: 6 – хлорит-актинолитовая, 7 – биотит-актинолитовая; 8 – эпидот-амфиболитовая фация, 9 – амфиболитовая фация.

Структура метагаббро неравномернoзернистая, нематобластовая с реликтовой габбровой и пойкилитовой, с явными признаками катаклаза. Реликты первичных магматических минералов представлены клинопироксеном и плагиоклазом. Максимальное содержание их в наименее измененных образцах около 35%. Количество новообразованных минералов (амфибол, биотит, карбонат) – 25–30%. До 5% занимает титанит; акцессории представлены рудными минералами (< 1%).

Исследования, включающие определения вариаций состава, плотности, упругих свойств, анизотропии упругих и поглощающих свойств, их неоднородности и др. свойств на образцах разных фаций имеют фундаментальный и практический интерес. Например, скоростная анизотропия существенно усложняет волновые характеристики и пути распространения сейсмических волн, изменяет распределение напряжений в массивах пород [11, 12, 15]. Известно, что скоростная анизотропия и неоднородность метаморфизованных пород, залегающих на больших глубинах, бывает сравнительно высокой. Выявление изменчивости петрофизических, упруго-анизотропных параметров кристаллических пород в зависимости от

интенсивности их метаморфической переработки – серьезная научная задача, решение которой позволяет увеличить достоверность интерпретации результатов геофизических работ в массивах древних горных пород.

Цель исследования – экспериментальные определения упругих и неупругих характеристик образцов метаморфических пород амфиболитовой фации метаморфизма, развитых в южной части Печенгской структуры в районе г. Кучин-тундра (рис. 1).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе работ изучены упругие и неупругие свойства 9 образцов амфиболитов и метагаббро из обнажений района горы Кучин-тундра. Вначале были изготовлены шлифы (рис. 2), и проведено петрографическое описание пород с определением их минерального состава (табл. 1). Структура амфиболитов нематобластовая, в целом средне-крупнозернистая, равномернозернистая. В метагаббро сохраняются реликты пойкилитовой структуры.

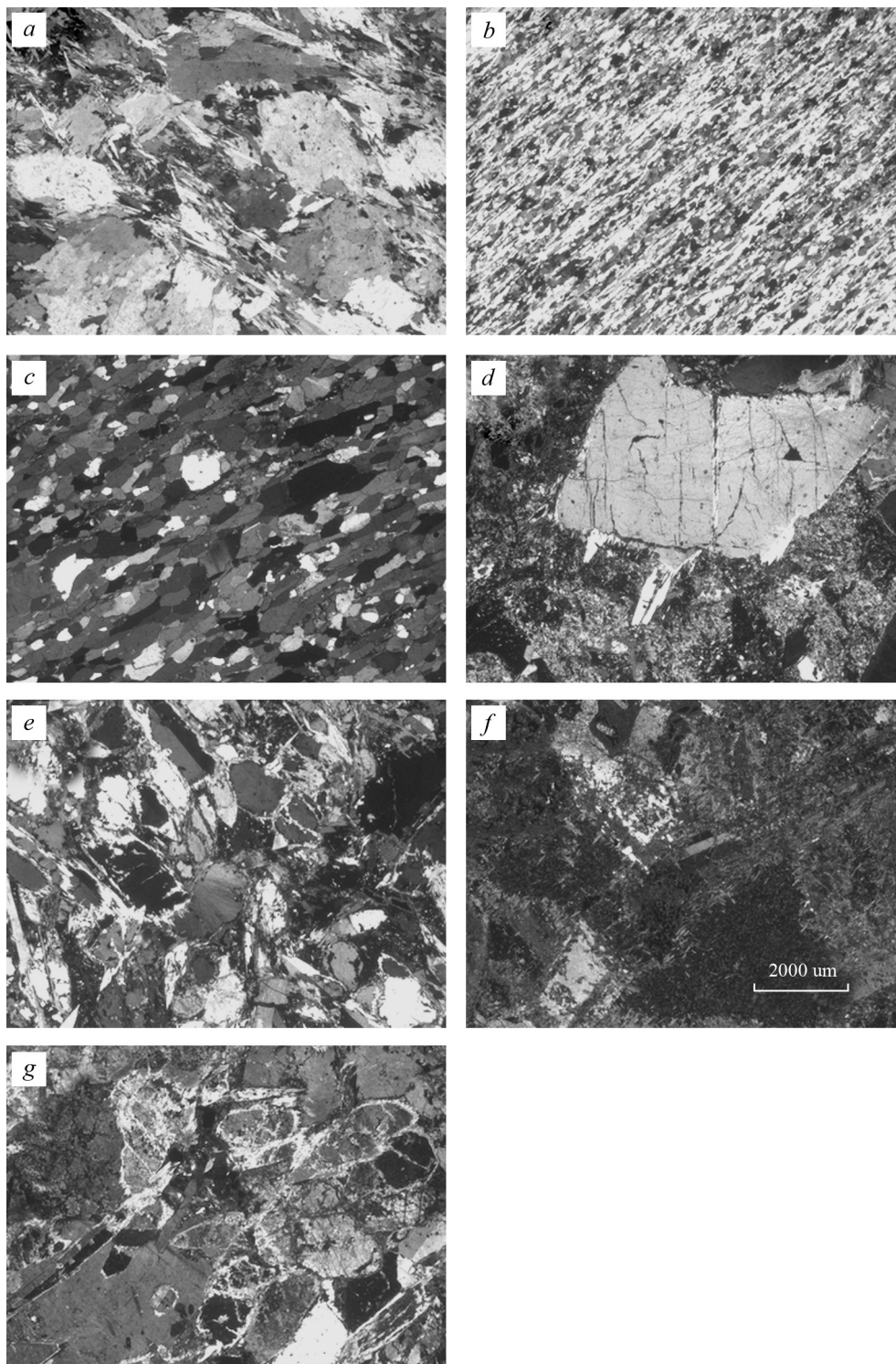


Рис. 2. Микрофотографии шлифов пород района горы Кучин-тундра. Образцы: *a* – v-1731 (амфиболит); *b* – v-1732 (полевошпатовый амфиболит), *c* – v-1734 (полевошпатовый амфиболит); *d* – v-1741-8 (мегагаббро), *e* – v-1741-9 (мегагаббро), *f* – v-1741-11 (мегагаббро), *g* – v-1744-9 (мегагаббро).

Затем для петрофизических определений были изготовлены образцы в форме куба размером 2–3 см. Методом Архимеда измерили объемную плотность ρ образцов (табл. 2). Определения ани-

зотропии упругих свойств образцов выполнены на основе последних усовершенствований акустополаризационного метода и соответствующего приборного комплекса [1, 3, 4, 9]. Отличитель-

Таблица 1. Минеральный состав и структура пород района горы Кучин-тундра

Номер образца	Наименование породы	Минеральный состав, %	Структура
v-13-1731	Амфиболит	Amp-98; Chl-1; Op-1	Средне-крупнозернистая, неравномернозернистая, нематобластовая
v-13-1732	Амфиболит полевошпатовый	Amp-75;	Мелкозернистая, равномернозернистая, гранонематобластовая
v-13-1737-1	Амфиболит	Qtz-10, Pl-10; Op-5 Amp-95; Qtz- 5	Среднезернистая, равномернозернистая, нематобластовая; тонкоигльчатый и сноповидный амфибол
v-13-1734	Амфиболит полевошпатовый	Qz-24; Pl-10;	Порода среднезернистая, равномернозернистая, гранонематобластовая
v-13-1744-9	Метагаббро	Op-1; Ttn-5; Amp-60 Pl-30; Cpx-34;	Нематобластовая, реликтовая габбровая, пойкилитовая
v-13-1741-9	Метагаббро	Amp-30; Ttn-6 Pl-34; Cpx-35;	Нематобластовая, реликтовая габбровая, пойкилитовая
v-13-1741-11	Метагаббро	Amp-26; Ttn-5 Pl-34; Cpx-36;	Нематобластовая, реликтовая габбровая, пойкилитовая
v-13-1741-8	Метагаббро	Amp-26; Ttn-4 Pl-35; Cpx-35;	Нематобластовая, реликтовая габбровая, пойкилитовая
v-13-1741-10	Метагаббро	Amp-25; Ttn-5 Pl-33; Cpx-35; Amp-27; Ttn-5	Нематобластовая, реликтовая габбровая, пойкилитовая

Примечание. Обозначение минералов дано по [18].

Таблица 2. Петрофизические свойства образцов района горы Кучин-тундра (экспериментальные данные)

№ образца	Наименование породы	Плотность ρ , г/см ³	Скорости V_{ij} , км/с			A_p , %	B_s , %	D_1, D_2, D_3
			V_{11}	V_{22}	V_{33}			
v-1731	амфиболит	3.06	5.48	3.39	3.51	16	12	0.16
			3.56	6.35	3.80			0.11
			3.49	3.85	6.92			0.05
v-1732	амфиболит полевошпатовый	2.96	5.75	3.36	3.31	12	10	0.11
			3.45	6.80	3.62			0.22
			3.45	3.76	6.21			0.00
v-1734	амфиболит полевошпатовый	2.87	—	2.07	2.07	—	35	0.07
			2.04	5.46	2.91			0.78
			2.91	3.07	4.51			0.51
v-1737-1	амфиболит	2.99	6.92	3.71	3.84	7	7	0.03
			3.66	6.37	3.72			0.11
			3.66	3.46	6.32			0.04
v-1741-8	метагаббро	3.29	5.35	3.30	3.43	3	5	0.01
			3.29	5.55	3.35			0.15
			3.36	3.47	5.55			0.46
v-1741-9	метагаббро	3.10	4.49	3.26	3.17	18	15	0.03
			3.18	5.75	3.51			0.09
			3.16	3.51	5.49			0.14
v-1741-10	метагаббро	3.09	5.91	3.37	3.64	0	8	0.12
			3.52	5.94	3.47			0.06
			3.51	3.45	5.90			0.01
v-1741-11	метагаббро	2.95	4.97	3.02	3.15	3	8	0.03
			3.06	5.02	3.19			0.02
			3.13	3.30	5.18			0.14
v-1744-9	метагаббро	3.01	5.43	3.28	3.33	10	6	0.06
			3.52	6.24	3.63			0.06
			3.36	3.52	5.91			0.01

ная особенность нового приборного комплекса состоит в наличии автоматизированного привода поворотной платформы акустополярископа, а в процессе измерений происходит передача данных в ПЭВМ в режиме реального времени [6, 7, 10].

Для акустополаризационных определений используются преобразователи, излучающие интенсивные, линейно-поляризованные чисто поперечные (сдвиговые) колебания [3]. Измерения осуществляются на частоте ультразвукового диапазона 1.25 МГц. На первом этапе измерения проводятся при параллельных векторах поляризации излучателя и приемника колебаний (положение ВП). Измеряются амплитуды колебаний, прошедших образец. На втором этапе векторы поляризации преобразователей устанавливаются под прямым углом (положение ВС).

Результат измерений – акустополяриграммы ВП и ВС – это круговые диаграммы изменения амплитуды огибающей импульса в пределах полного угла поворота образца. Уникальное достоинство акустополаризационного метода состоит в том, что он позволяет определить положение элементов симметрии анизотропной среды без измерения индикатриссы скорости распространения упругих волн. Также появляется возможность обнаруживать особенности распространения упругих волн в твердых анизотропных средах и явления, возникающие при их распространении [8]. По акустополяриграммам ВП определяются наличие и степень проявления эффекта линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП). По акустополяриграммам ВС определяют число и направленность проекций элементов упругой симметрии анизотропного образца, выявляют деполяризацию сдвиговых волн (ДСВ) [5].

На последующих этапах измеряются величины скорости распространения продольных и поперечных упругих колебаний, производят вычисление коэффициентов и показателей анизотропии, определение типа упругой симметрии породы. Результаты измерений на образцах величин скорости распространения продольных (V_p), поперечных (V_s) по всем граням кубических образцов представлены в виде квазиматрицы V_{ij} (см. табл. 2, [4])

$$\begin{matrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{matrix} ,$$

где V_{11}, V_{22}, V_{33} – скорости распространения продольных колебаний, измеренные в направлениях 1–1', 2–2', 3–3'; скорости распространения поперечных колебаний: V_{12}, V_{13} – измеренные в направлении 1–1' при ориентировке векторов поляризации (ОВП) в направлении 2–2', 3–3'; V_{21}, V_{23} – измеренные в направлении 2–2' при ОВП в направлении 1–1', 3–3'; V_{31}, V_{32} – измеренные в направлении 3–3' при ОВП в направлении 1–1', 2–2' соответственно.

Для оценки степени анизотропии образца в целом по величинам скорости продольных колебаний применяют формулы для расчета обобщенного коэффициента анизотропии и коэффициентов двулучепреломления поперечных волн [3, 4, 9].

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Фотографии шлифов наиболее представительных пород района г. Кучин-тундра приведены на рис. 2. Акустополяриграммы образцов пород отображены на рис. 3. В табл. 2 приведены номера образцов, их наименование, плотность (ρ), квазиматрицы величин скорости распространения продольных и поперечных колебаний (V_{ij}), коэффициенты (A_p) и показатели (B_s) упругой анизотропии, а также показатели степени проявления линейной акустической анизотропии поглощения (D_1, D_2, D_3), рассчитанные для 1-й, 2-й и 3-й граней образца.

Плотность метагаббро несколько выше плотности амфиболитов (см. табл. 2). Это можно объяснить тем, что в минеральном составе амфиболитов содержится больше минералов низкой плотности – кварца и амфибола.

Анализ акустополяриграмм ВП и ВС показывает, что у большей части образцов (см. рис. 3) наблюдаются симметричные четырехлепестковые фигуры, что означает наличие в породах упругой анизотропии. На большинстве акустополяриграмм ВС можно провести прямые линии, соединяющие минимумы амплитуды проходящего через образец сигнала, и тем самым определить пространственное положение проекций элементов упругой симметрии. Три проекции по трем парам граней образца позволяют определить пространственное положение элементов симметрии. Наблюдаемое отличие форм диаграмм (см. рис. 3) от теоретических [3] обусловлено наличием структурных неоднородностей в строении пород.

Сравнение акустополяриграмм с текстурой, отображенной в плоскости шлифов (см. рис. 2) позволяет заметить, что директивность в очер-

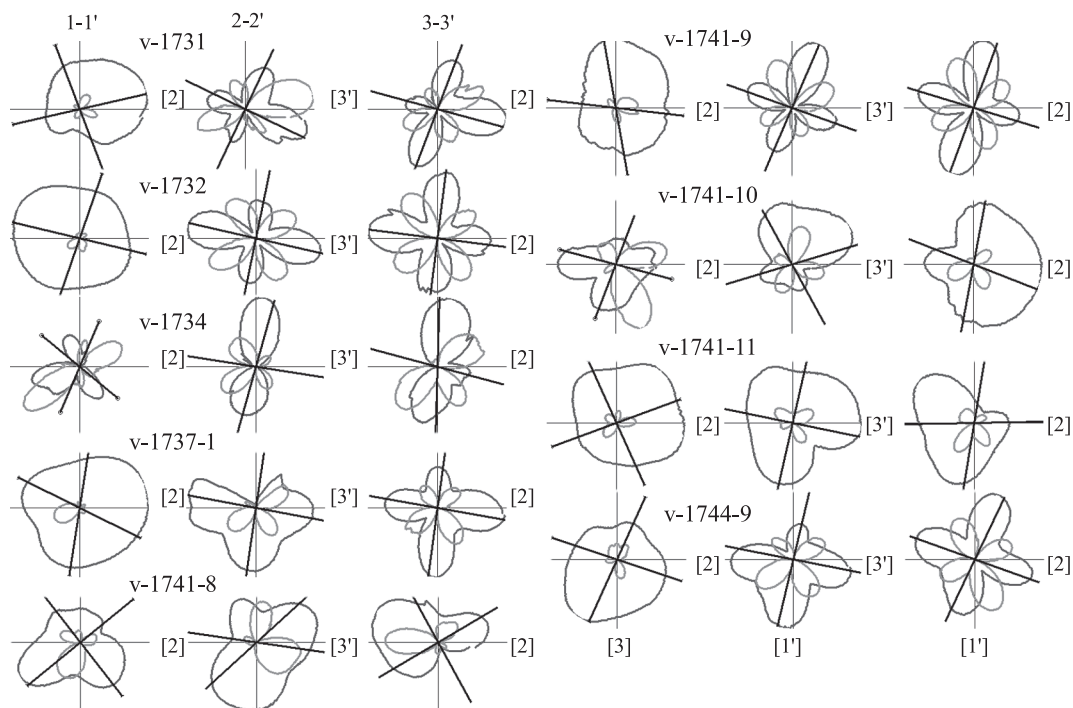


Рис. 3. Акустополариграммы образцов пород района горы Кучин-тундра. Амфиболиты: v-1731, v-1737-1; полевошпатовые амфиболиты: v-1732, v-1734; метагаббро: v-1741-8, v-1741-9, v-1741-10, v-1741-11, v-1744-9. Темная линия – векторы параллельны (ВП), светлая – скрещены (ВС).

тании минеральных зерен сопровождается признаками наличия анизотропии в акустополариграммах ВП и ВС (см. рис. 3, шлифы v-1731, v-1732, v-1734). Хаотичное распределение очертаний минеральных зерен, наличие скоплений мелких зерен в образцах v-1741-11, v-1744-9 отразились в акустополариграммах ВП и ВС. Их очертания близки к формам диаграмм изотропного образца, но обладающего неоднородным распределением минеральных зерен [3]. В образце метагаббро (v-1741-8) обнаруживается влияние крупного зерна клинопироксена ($C_{rx} = 35\%$). Искажение пути лучей, обусловленное этим зерном, выразилось в “выдавливании” акустополариграмм ВП и ВС в одну сторону.

Акустополариграммы ВП некоторых образцов имеют отчетливо уплощенные очертания. Это свидетельствует о проявлении эффекта ЛААП. Максимальное проявление ЛААП наблюдается в образце полевошпатового амфиболита (v-1734: ось 1–1', $D_1 = 0.07$; ось 2–2', $D_2 = 0.78$; ось 3–3', $D_3 = 0.51$). Средняя степень ЛААП ($D > 0.1$) проявляется в образцах амфиболита (v-1731: ось 1–1', $D_1 = 0.16$; ось 2–2', $D_2 = 0.11$), полевошпатового амфиболита (v-1732: ось 1–1', $D_1 = 0.11$; ось 2–2', $D_2 = 0.22$) и метагаббро (v-1741-9: ось 2–2', $D_2 = 0.09$; ось 3–3', $D_3 = 0.14$). В остальных образцах эффект ЛААП практически не проявляется

($D < 0.1$), при этом явление упругой анизотропии в образцах v-173-1, v-1741-9, v-1741-10, v-1744-9 выражено достаточно сильно. Более ранними исследованиями показано, что этот эффект, как правило, возникает при наличии ориентированной микротрещиноватости и преимущественной ориентировки удлиненных зерен минералов [4].

На акустополариграммах образцов, за исключением v-1731, v-1744-9, наблюдается отклонение направления наибольшего пропускания ЛААП от ориентации проекций элементов упругой симметрии – так называемое явление углового несогласия (УНС). Чаще всего такое рассогласование встречается, когда преимущественное направление микротрещин не совпадает с преобладающей ориентацией кристаллоупругих осей минеральных зерен. Наиболее характерный пример проявления УНС по всем трем граням зафиксирован в образцах полевошпатового амфиболита (v-1734), амфиболита (v-1737-1) и метагаббро (v-1741-10, v-1741-11). В этих образцах преимущественное направление микротрещин образует некоторый угол с преобладающей ориентацией элементов кристаллоакустической симметрии. Таким образом, явление ЛААП не всегда соподчинено упругой анизотропии.

Акустополариграммы некоторых образцов характеризуются аномально большими и округлен-

ной формы диаграммами ВС. Как показано ранее [5], такие формы акустополяриграмм наблюдаются в случае, если в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, кристаллоакустические оси минеральных зерен распределены в широком диапазоне углов. Максимальная амплитуда диаграмм ВС при этом может превзойти амплитуду ВП. В этом случае наблюдается эффект деполяризации сдвиговых волн (ДСВ). Существенное проявление этого эффекта зарегистрировано в образцах полевошпатового амфиболита (v-1734, грани 1–1' и 33'), метагаббро (v-1741-10, грань 1–1') и объясняется наибольшим числом разнородных минералов в составе породы (см. рис. 2).

На форму акустополяриграмм образцов также влияют неоднородности и разноориентированная микротрещиноватость. Несимметричная, угловатая форма акустополяриграмм ВП образцов v-1731, v-1734, v-1737-1, v-1741-10, v-1744-9 свидетельствует о существенном влиянии этих факторов на их упругие свойства. Наименьшее влияние неоднородностей наблюдается в образцах метагаббро (v-1732, v-1741-9).

В целом сравнение очертаний акустополяриграмм показывает, что их форма не позволяет отличить породы разного минерального состава, например, амфиболиты от метагаббро. Таким образом, форма акустополяриграмм определяется не их минеральным составом, а структурно-текстурными особенностями пород, обусловленными, в свою очередь, конкретными палеогеодинамическими условиями, сформировавшими ту или иную текстуру и неоднородность конкретного образца. Упруго-анизотропный облик породы складывается из локальных соотношений в поле палеонапряжений, которые существовали в данном конкретном месте [4].

Анализ результатов определений скорости распространения продольных и поперечных волн, представленных в табл. 2, показывает, что каждая из скоростных характеристик пород содержит определенную (детерминированную) и некоторую случайную (флуктуационную) составляющие. Наибольшие и наименьшие значения скорости распространения продольных и поперечных волн зарегистрированы соответственно в образцах амфиболита (v-1737-1: средняя скорость распространения продольных волн $V_{\text{Pcp}} = 6.54$ км/с, поперечных – $V_{\text{Scp}} = 3.68$ км/с) и полевошпатового амфиболита (v-1734: $V_{\text{Pcp}} = 4.98$ км/с, $V_{\text{Scp}} = 2.51$ км/с).

Для определения типа упругой симметрии образцов совместно с анализом полученных акустополяриграмм проведен анализ скоростных

соотношений (СС) в квазиматрицах V_{ij} (табл. 3) [9]. В некоторых образцах отмечаются различия в скорости распространения продольных волн следующих типов: $V_{33} > V_{22} > V_{11}$ (v-1731); $V_{22} > V_{33} > V_{11}$ (v-1732, v-1734, v-1744-9). Подобные соотношения скоростей обычно характерны для орторомбического типа симметрии, который характеризуется по меньшей мере двумя взаимно ортогональными плоскостями симметрии [2, 14]. В изучаемых породах такую структуру можно представить моделью в виде двух взаимно перпендикулярных систем плоскопараллельных слоев, каждый из которых может быть образован системами листовых или цепочечных силикатов (биотит, роговая обманка и др.). Строгое соответствие орторомбической симметрии могло быть зафиксировано, если бы в матрице V_{ij} наблюдалось, например, соотношение для скоростей продольных и поперечных волн:

$$V_{11} > V_{22} > V_{33}; (V_{12} = V_{21}) > (V_{13} = V_{31}) > (V_{23} = V_{32}).$$

Необходимо уточнить, что при внимательном анализе акустополяриграмм образцов (см. рис. 3) амфиболита (v-1731), полевошпатового амфиболита (v-1732) и метагаббро (v-1744-9) наблюдаются большие лепестки у диаграмм ВП и минимальные у диаграмм ВС. В подобном случае данные образцы следует отнести к близким к поперечно-изотропному типу упругой симметрии, который обычно имеет иные соотношения в матрице V_{ij} (см. табл. 3), например $V_{11} > V_{22} = V_{33}$ (v-1737-1), $V_{22} \sim V_{33} > V_{11}$ (v-1741-9) или $V_{33} \sim V_{22} = V_{11}$ (v-1741-11). Подобные соотношения $V_{22} = V_{33} \sim V_{11}$, $V_{22} = V_{33} = V_{11}$ наблюдаются также в образцах метагаббро (v-1741-8, v-1741-10). Однако акустополяриграммы этих образцов показывают наличие проекций элементов симметрии на всех трех гранях и соответственно при более строгом подходе их следует отнести к орторомбическому типу симметрии. Отсюда следует, что акустополярископия является тонким инструментом, позволяющим более точно определить, к какому типу симметрии относится порода. В итоге, 6 образцов (v-1731, v-1732, v-1737-1, v-1741-9, v-1741-11, v-1744-9) можно отнести к поперечно-изотропному типу упругой симметрии и 3 образца (v-1734, v-1741-8, v-1741-10), – к орторомбическому. Конечно, упругую анизотропию кристаллических пород нельзя соотносить с кристаллами, имеющими тот или иной определенный тип симметрии. Эти типы симметрий можно называть только квазисимметриями. Приведенные данные позволяют судить о том или ином распределении палеонапряжений, сформировавших упругую анизотропию данной породы [4].

Таблица 3. Скоростные соотношения и тип упругой симметрии образцов района горы Кучин-тундра

№ образца	Скоростные соотношения	Тип симметрии
v-1731	$V_{33} > V_{22} > V_{11}$ $V_{32} = V_{23} > V_{21} = V_{13} = V_{31} \sim V_{12}$ $(V_{32} = V_{23}) > (V_{21} \sim V_{12}) = (V_{13} = V_{31})$	T
v-1732	$V_{22} > V_{33} > V_{11}$ $V_{32} > V_{23} > V_{21} = V_{31} \sim V_{12} = V_{13}$ $(V_{32} > V_{23}) > (V_{21} \sim V_{12}) = (V_{31} \sim V_{13})$	T
v-1734	$V_{22} > V_{33} > V_{11}$ $V_{32} = V_{31} > V_{23} = V_{12} \sim V_{13} > V_{21}$ $(V_{32} > V_{23}) = (V_{31} > V_{13}) > (V_{12} > V_{21})$	R
v-1737-1	$V_{11} > V_{22} = V_{33}$ $V_{13} \sim V_{23} = V_{12} = V_{21} = V_{31} > V_{32}$ $(V_{13} \sim V_{31}) \sim (V_{23} > V_{32}) = (V_{12} = V_{21})$	T
v-1741-8	$V_{22} = V_{33} \sim V_{11}$ $V_{32} = V_{13} \sim V_{31} = V_{23} = V_{12} = V_{21}$ $(V_{32} \sim V_{23}) > (V_{13} \sim V_{31}) \sim (V_{12} = V_{21})$	R
v-1741-9	$V_{22} \sim V_{33} > V_{11}$ $V_{23} = V_{32} > V_{12} \sim V_{21} = V_{13} = V_{31}$ $V_{23} = V_{32} > (V_{12} \sim V_{21}) \sim (V_{13} = V_{31})$	T
v-1741-10	$V_{22} = V_{33} = V_{11}$ $V_{13} > V_{21} = V_{31} = V_{23} = V_{32} \sim V_{12}$ $(V_{13} > V_{31}) > (V_{21} \sim V_{12}) = (V_{23} = V_{32})$	R
v-1741-11	$V_{33} \sim V_{22} = V_{11}$ $V_{32} > V_{23} = V_{13} = V_{31} \sim V_{21} \sim V_{12}$ $(V_{32} > V_{23}) > (V_{13} = V_{31}) \sim (V_{21} \sim V_{12})$	T
v-1744-9	$V_{22} > V_{33} > V_{11}$ $V_{23} \sim V_{32} = V_{21} > V_{31} = V_{13} \sim V_{12}$ $(V_{23} \sim V_{32}) = (V_{21} > V_{12}) > (V_{31} = V_{13})$	T

Примечания. T, R – обозначения типа упругой симметрии: поперечно-изотропный (трансверсально-изотропный), орторомбический соответственно.

Полученные величины A_p и B_s (см. табл. 2) в целом позволяют заключить, что образцы пород участка горы Кучин-тундра центрального района Кольско-Норвежского блока как слабо-, так и сильно анизотропны. Показатели анизотропии, определенные по продольным волнам, изменяются в пределах $A_p = 0-18\%$, по поперечным $B_s = 5-35\%$. В целом наибольшими значениями показателей A_p и B_s обладает полевошпатовый амфиболит (v-1734), а меньшим – метагаббро (v-1741-10). Следует отметить, что в архейской части разреза СГ-3 полученные значения A_p и B_s образцов находятся в более узком диапазоне изменений [16].

Возможное влияние количественных показателей минерального состава на явление линей-

ной акустической анизотропии поглощения не выявляется (см. табл. 1, 2, рис. 3). Коэффициенты упругой анизотропии A_p , B_s (см. табл. 2) в среднем выше у амфиболитов и полевошпатовых амфиболитов, чем у метагаббро. При этом образец v-1741-9 метагаббро показал высокие значения $A_p = 18\%$, $B_s = 15\%$. Как правило, амфиболиты от метагаббро отличают по текстуре породы (см. рис. 2). В отличие от метагаббро амфиболиты обладают директивными текстурами и соответственно должны проявлять заметную упругую анизотропию. Таким образом, количественные значения коэффициентов упругой анизотропии позволяют отличить массивные текстуры от директивных.

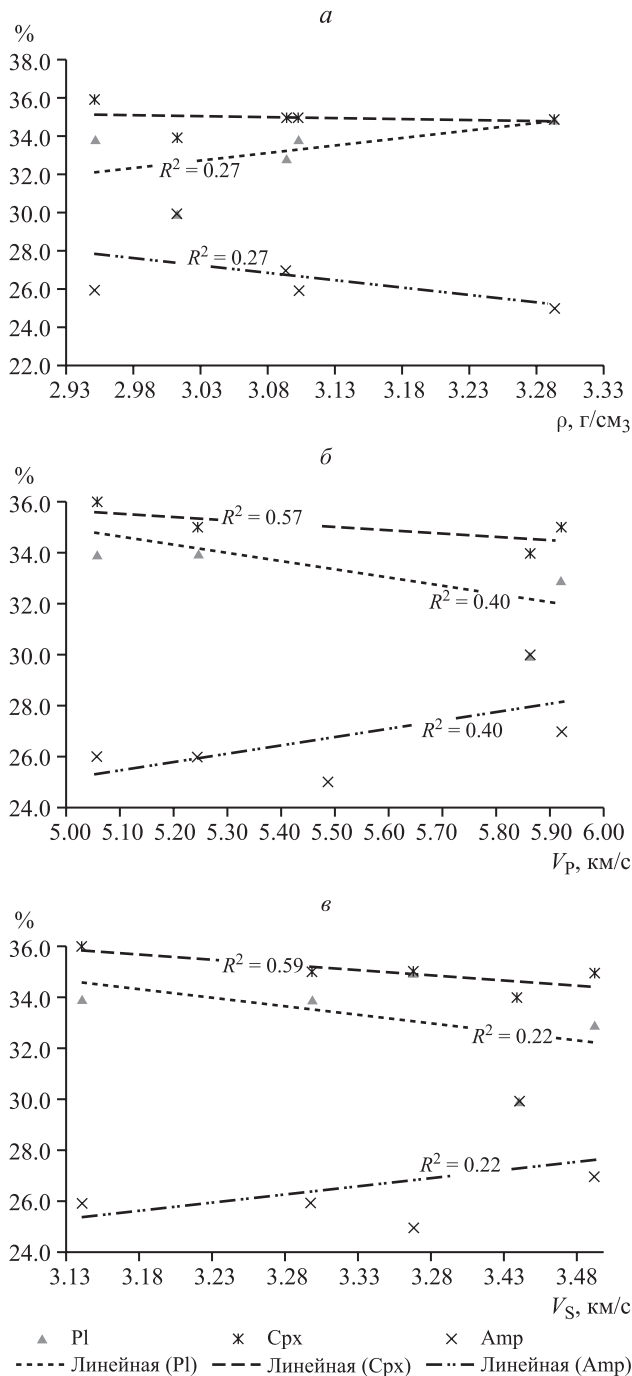


Рис. 4. Зависимость плотности (а), скоростей V_p (б) и V_s (в) от количественного состава основных породообразующих минералов (эксперимент): Pl – плагиоклаз; Cpx – клинопироксен; Amp – амфибол.

Анализ данных табл. 2 показывает, что образцам с большей плотностью соответствуют большие средние скорости продольных и поперечных волн. Корреляционные графики зависимости величин плотности ρ , скорости распространения продольных V_p и поперечных V_s колебаний от содержания отдельных минералов представлены

на рис. 4. Из них следует, что плотность (рис. 4а) слабо зависит от содержания клинопироксена и плагиоклаза. Это объясняется тем, что образцы пород, отобранные с земной поверхности, подвергаются процессам выветривания, и их пористость может быть высокой.

Зависимости V_p и V_s от минерального содержания выражены более четко (рис. 4б, 4в). В целом образцы, содержащие больший процент плагиоклаза и клинопироксена, обладают меньшими значениями скоростей. Соответственно V_p и V_s возрастают при увеличении содержания амфибола.

ВЫВОДЫ

Экспериментально исследованы главные породные разновидности участка горы Кучин-тундра, слагающие юго-восточный фланг Печенгской палеопротерозойской структуры: амфиболиты; полевошпатовые амфиболиты; метагаббро. Сравнение акустополяриграмм со структурными элементами, отображенными в плоскости шлифов, позволило отметить, что директивность в очертании минеральных зерен сопровождается признаками наличия анизотропии в акустополяриграммах ВП и ВС. Результаты акустополярископии пород показали довольно частое проявление эффектов линейной акустической анизотропии поглощения и деполаризации сдвиговых волн. На форму акустополяриграмм образцов также влияют неоднородности и разноориентированная микротрещиноватость.

Результаты определений петрофизических свойств показали широкие вариации плотностных и упругих характеристик пород. Вариации значений плотности образцов, отобранных с земной поверхности, находятся в пределах 2.87–3.29 г/см³. Скорости распространения продольных волн в среднем изменяются в пределах 4.98–6.54 км/с. Диапазон изменений скорости поперечных волн для поверхностных пород составляет 2.33–3.68 км/с. Образцы пород участка горы Кучин-тундра могут быть как слабо-, так и сильноанизотропными. Соотношения отдельных значений в квазиматрицах скоростей выявили наличие поперечноизотропной и ортотропной квазисимметрий в протестированных образцах.

Породы проявляют заметную упругую анизотропию, которая имеет значительные вариации. Например, изменения коэффициента анизотропии A_p составляют 0–18%, показателя анизотропии B_s – 5–35%. В целом изменчивость петрофизических свойств пород на юго-восточном фланге Печенгской структуры, в районе горы Кучин-тундра, очень значительна, что указывает на сложную палеогеодинамическую обстановку этого участка.

Прослеживаются определенные корреляционные связи между процентным содержанием того или иного минерала в породе и величинами плотности, скорости распространения продольных и поперечных волн. Обзор тенденций изменения параметров показывает, что увеличение процентной доли амфибола приводит к повышению скоростей распространения в породе продольных и поперечных волн. Увеличение содержания клинопироксена и плагиоклаза наоборот приводит к уменьшению значений характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 13-05-00125-а, 16-05-00026-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol (АПАКА) для оценки качества материалов и объектов из природного камня // Контрольно-измерительные приборы и системы. М.: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2012. № 4. С. 10.
2. Александров К.С., Продайвода Г.Т. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 354 с.
3. Горбачевич Ф.Ф. Акустополарископия горных пород. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1995. 203 с.
4. Горбачевич Ф.Ф. Акустополарископия породообразующих минералов и кристаллических пород. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. 140 с.
5. Горбачевич Ф.Ф. Явление деполяризации сдвиговых волн в анизотропных гетерогенных средах // Физика Земли. 1998. № 6. С. 83–90.
6. Ковалевский М.В. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol: Учеб. пос.: Апатиты: Изд-во ООО “К & М”, 2009. 54 с.
7. Ковалевский М.В. Acoustpol – новшество или инновация? // Тьетта. 2010. № 3. С. 42–45.
8. Ковалевский М.В. Акустополаризационные эффекты горных пород Кольско-Норвежского блока Балтийского щита // Физическая акустика. Нелинейная акустика. Распространение и дифракция волн. Акустоэлектроника. Геологическая акустика. Сб. трудов XXV сессии Российского акустического общества. Т. 1. М.: ГЕОС, 2012. С. 360–364.
9. Ковалевский М.В. Методика определения скоростных соотношений упругих волн в задачах акустополарископии // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Матер. 16-й науч. конф. Сыктывкар: Геопринт, 2007. С. 69–72.
10. Ковалевский М.В., Головатая О.С., Горбачевич Ф.Ф. Автоматический акустополарископ для измерения упругих и неупругих параметров твердых сред // Сб. трудов XI сессии РАО. М.: ГЕОС, 2001. Т. 2. С. 117–121.
11. Кольская сверхглубокая. М.: Недра, 1984. 490 с.
12. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / Под ред. В. П. Орлова, Н. П. Лаверова. М.: МФ “Технонефтегаз”, 1998. 260 с.
13. Петров В. П. Метаморфизм раннего протерозоя Балтийского щита. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1999. 325 с.
14. Продайвода Г.Т. Принципы симметрии в петрофизике // Геологический журнал. 1978. Т. 38. № 4. С. 61–69.
15. Сейсмогеологическая модель литосферы Северной Европы: Баренц-регион. Ч. I. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1998. 237 с.
16. Строение литосферы российской части Баренц-региона / Под ред. Н. В. Шарова, Ф. П. Митрофанова, М. Л. Вербы, К. Гиллена. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. 318 с.
17. Фации регионального метаморфизма Кольского полуострова. Л.: Наука, 1977. 88 с.
18. Kretz R. Symbols for rock-forming minerals // Amer. Mineral. 1983. V. 68. P. 277–279.

REFERENCES

1. Avtomatizirovanniy programmno-apparatnyi kompleks Acoustpol (APAKA) dlya otsenki kachestva materialov i ob'ektov iz prirodnogo kamnya [Automated software – hardware complex Acoustpol (ASHCA) for assessing the quality of materials and objects made of natural stone]. *Kontrol'no-izmeritel'nye pribory i sistemy*. Moskovskii gosudarstvennyi universitet im. Bauman, 2012, no. 4, 10 p. (in Russian).
2. Aleksandrov, K.S., Prodaivoda, G. T. *Anizotropiya uprugikh svoystv mineralov i gornykh porod* [Anisotropy of elastic properties of minerals and rocks]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2000, 354 p. (in Russian).
3. Gorbatsevich, F. F. *Akustopolyariskopiya gornykh porod* [Acoustopolariscopy of rocks]. Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 1995, 203 p. (in Russian).
4. Gorbatsevich, F. F. *Akustopolyariskopiya porodoobrazuyushchikh mineralov i kristallicheskikh porod* [Acoustopolariscopy of rock minerals and crystalline rocks], Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 2002, 140 p.
5. Gorbatsevich, F. F. *Yavlenie depolyarizatsii sdvigovykh voln v anizotropnykh geterogennykh sredakh* [Phenomenon of shear wave depolarization in anisotropic heterogeneous media]. *Fizika Zemli*, 1998, no. 6, pp. 83–90 (in Russian).
6. Kovalevskiy, M. V. *Avtomatizirovanniy programmno-apparatnyi kompleks Acoustpol* [Automated hardware-software complex Acoustpol], Apatity: K & M Publ., 2009, 54 p. (in Russian).
7. Kovalevskiy, M. V. *Acoustpol – novshество ili innovatsiya?* [Automated software – hardware complex Acoustpol – novelty or innovation?]. *Tietta*, 2010, no. 3, pp. 42–45 (in Russian).
8. Kovalevskiy, M.V. [Acoustopolarization effects of rocks of the Kola-Norwegian block of the Baltic Shield]. *Fizicheskaya akustika. Nelineinaya akustika. Rasprostranenie i difraktsiya voln. Akustoelektronika. Geologicheskaya akustika. Sb. Trudov XXV sessii Rossiiskogo akusticheskogo obshchestva*. [Physical acoustics. Nonlinear acoustics. Wave propagation and diffraction. Acoustoelectronics. Geological acoustics. Pro-

- ceedings of the XXV Session of the Russian Acoustic Society]. Moscow, GEOS, 2012, vol. 1, pp. 360–364 (in Russian).
9. Kovalevskiy, M.V. [Methods of determining elastic wave velocity relations in acoustopolariscopy tasks]. *Struktura, veshchestvo, istoriya litosfery Timano-Severoural'skogo segmenta. Mater. 16 nauchn. konferentsii* [Structure, substance and the history of the Timan-Urals lithosphere segment: Proceedings of the 16th Sci. Conf.]. Syktyvkar: Geoprint, 2007, pp. 69–72 (in Russian).
 10. Kovalevskiy, M.V., Golovataya, O.S., Gorbatshevich, F.F. [Automatic acoustopolariscopy for measuring elastic and nonelastic parameters of solid media]. *Sbornik trudov XI sessii RAO* [Proceedings of the XI Session of the Russian Acoustic Society]. Moscow: GEOS, 2001, vol. 2, pp. 117–121 (in Russian).
 11. *Kol'skaya sverkhglubokaya* [Kola superdeep well]. Moscow: Nedra, 1984, 490 p. (in Russian).
 12. *Kol'skaya sverkhglubokaya. Nauchnye rezul'taty i opyt issledovaniy*. [Kola superdeep well. Scientific results and research experience]. Orlov, V.P., Laverov, N.P., Eds. Moscow: Tekhnoneftegaz, 1998, 260 p. (in Russian).
 13. Petrov, V. P. *Metamorfizm rannego proterozoya Baltiiskogo shchita* [Metamorphism of the Early Proterozoic of the Baltic Shield]. Apatity: Izd. KNTs RAN, 1999, 325 p. (in Russian).
 14. Prodaivoda, G. T. *Printsipy simmetrii v petrofizike* [Symmetry principles in petrophysics]. *Geologicheskii zhurnal*, 1978, vol. 38, no. 4, pp. 61–69 (in Russian).
 15. *Seismogeologicheskaya model' litosfery Severnoi Evropy: Barents-region* [Seismogeological model of Northern Europe lithosphere: the Barents Region]. Part I. Apatity: Izd. KNTs RAN, 1998, 237 p. (in Russian).
 16. Stroenie litosfery rossiiskoi chasti Barents-regiona [The structure of the lithosphere of the Russian part of the Barents Region]. Sharov, N.V., Mitrofanov, F.P., Verba, M.L., Gillen, C., Eds. Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2005, 318 p. (in Russian).
 17. *Fatsii regional'nogo metamorfizma Kol'skogo poluostrova* [Facies of regional metamorphism in the Kola Peninsula]. Leningrad: Nauka, 1977, 88 p. (in Russian).
 18. Kretz, R. Symbols for rock-forming minerals. *Amer. Mineral.*, 1983, no. 68, pp. 277–279.

ELASTIC-ANISOTROPIC PROPERTIES OF METAMORPHIC ROCKS IN THE SOUTH-EASTERN PART OF THE PECHENGA STRUCTURE (MOUNT KUCHIN-TUNDRA AREA, THE BALTIC SHIELD)

M. V. Kovalevskiy*, F. F. Gorbatshevich*, V. R. Vetrin*, O. M. Trishina*, V. F. Smol'kin**, E. N. Fomina*

*Geological Institute, Kola Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Fersmana 14, Apatity, Murmansk oblast, 184209 Russia. E-mail: koval@geoksc.apatity.ru

**Vernadsky State Geological Museum, Russian Academy of Sciences, 125009, Mokhovaya ul. 11, Moscow, 125009 Russia. E-mail: v.smolkin@sgm.ru

The study presents the acoustic-polarization method. It is used for studying the propagation of elastic waves in heterogeneous solid (elastic anisotropic) media, which include minerals, crystals and rocks. Complex Acoustopol (rating of investment attractiveness – RSR “AA”) is based on this method. This complex is used in the following industrial sectors: aircraft construction, sport equipment, mechanical engineering, metallurgy, energy, mining, seismic survey, building, drilling, cosmic construction, radioactive waste recycling, production of facing tiles, cellular concrete production, studying the internal structure of crystals, rocks and materials in science (geology, geophysics, archaeology, crystallography). The results of the study are meant for geological and geophysical studies, including evaluation of variations in composition, density, elastic properties, anisotropy of elastic and absorbing properties, their heterogeneity. For example, velocity anisotropy significantly complicates the wave characteristics and propagation paths of seismic waves, changes stress distribution in rock masses. Velocity anisotropy and heterogeneity of metamorphosed rocks occurring at great depths are known to be relatively high. On this basis, the main scientific task is to reveal the variability of petrophysical, elastic-anisotropic parameters of crystalline rocks depending on the intensity of their metamorphic processing. Having solved this problem, it will be possible to increase the interpretation reliability of the geophysical work results for ancient rock masses.

The goal of the study is experimental determination of elastic and inelastic characteristics of the rock samples metamorphosed at amphibolite facies that occur in the southern part of the Pechenga structure in Mt Kuchin-tundra area. The results of experimental study of elastic-anisotropic properties of metamorphic rocks dominating in the south-eastern wing of the Pechenga Palaeoproterozoic structure (Mt Kuchin-tundra area) are presented in the work. The rocks are represented by amphibolite, feldspar amphibolite and metagabbro. The studies were conducted with the use of the acoustic polarization method. The range of changes in the density values is 2.87–3.29 g/cm³, in the compression wave velocities – 4.98–6.54 km/s, in the shear wave velocities – 2.51–3.68 km/s. Wide variations in velocity anisotropy of rocks were revealed. They are caused by the variability of the composition and degree of the rock metamorphic processing. The acoustic polarization method allows one to quantify the rock structure.

Key words: *transducers for shear waves, amplitude, elastic wave velocities, acoustopolariscopy, elastic anisotropy, polarization, rock, sample.*