СРАВНЕНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД ПРЕНИТ-ПУМПЕЛЛИТОВОЙ И АМФИБОЛИТОВОЙ ФАЦИЙ МЕТАМОРФИЗМА (КОЛЬСКИЙ П-ОВ)

О. М. Тришина, Ф. Ф. Горбачевич, В. Р. Ветрин

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

trishina@geoksc.apatity.ru

Изучены петрофизические свойства метавулканитов материнской свиты Печенгской палеорифтогенной структуры и пород массива западной части оз. Чудзьявр. Метавулканиты Печенгской структуры метаморфизованы в условиях пренит-пумпеллиитовой, а породы массива оз. Чудзьявр — амфиболитовой фаций. Проведена оценка упругой анизотропии пород методом акустополарископии, выполнены определения плотности, скорости продольных и поперечных волн и др. в лабораторных условиях. Проведено моделирование плотности, скоростных характеристик пород с целью оценки их глубинных свойств. По данным лабораторных исследований, образцы пренит-пумпеллиитовой фации показывают большие значения плотности, скорости продольных и поперечных волн, чем образцы амфиболитовой фации. Показано, что модельные (вычисленные) плотности, скоростные характеристики пород массива оз. Чудзьявр значительно превышают экспериментальные данные. Метод акустополарископии позволяет визуаль-но отличить породы пренит-пумпеллиитовой от амфиболитовой фации метаморфизма.

Ключевые слова: порода, метаморфизм, плотность, скорость, анизотропия, акустополарископия.

COMPARISON OF PETROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF PRENITE-PUMPELLYITE AND AMPHIBOLITE METAMORPHIC FACIES (KOLA PENINSULA)

O. M. Trishina, F. F. Gorbachevich, V. R. Vetrin

Geological Institute of KSC RAS, Apatity

Petrophysical properties of the metavolcanites from the Matert Fm of the Pechenga palaeorift structure and the massif rocks of western Lake Chudzyavr have been studied. Metavolcanites of the Pechenga structure are metamorphosed at prehnite-pumpellyite and massif rocks of Lake Chudzyavr — at amphibolite facies. An assessment of the rock elastic anisotropy by the acoustopolariscopy method has been made, the densities, compression and shear wave velocities et al. have been determined in lab conditions. The simulation of density, velocity characteristics of the rocks has been carried out in order to assess their deep properties. According to the laboratory studies, the samples of prehnite-pumpellyite facies show greater densities, compression and shear wave velocities than those of amphibolite facies. It was shown that the model (calculated) densities, velocity characteristics of the massif rocks from Lake Chudzyavr were much greater than the experimental data. A comparison of the acoustopolarigrams shows that using the acoustopolariscopy method one can visually distinguish rocks of prehnite- pumpellyite facies from those of amphibolite facies of metamorphism.

Keywords: rocks, metamorphism, density, velocity, anisotropy, acoustopolariscopy.

Введение

В районе верхнего течения р. Соукерйоки, расположенном в северной части палеопротерозойской Печенгской палеорифтогенной структуры, обследованы метавулкани-ты материнской свиты пильгуйярвинской серии, а также дайковые тела интрузивных пород — габбродиабазов, габ-бро (рис. 1). Метавулкани-ты представлены породами ба-зальтового состава, метаморфизованными в условиях пре-нит-пумпеллиитовой фации ($P = 3\text{--}6$ кбар, $T = 0\text{--}250$ °C): диабазами, шаровыми лавами, лаво- и туфобрекчия-ми, туфами, на долю которых приходится главная часть объема толщи. Среди интрузивных образований наибо-лее распространены метагаббродиабазы, образующие те-ла северо-восточного и меридионального простирания. Текстура пород массивная. К главным породообразую-щим минералам относятся плагиоклаз (Pl), хлорит (Chl), актинолит (Act), кварц (Qz). Присутствуют второстепен-ные и аксессуарные минералы — флогопит, эпидот, иль-менит, ортоклаз, апатит, серпентин, карбонат, пренит. Образцы шлифов пренит-пумпеллиитовой фации мета-морфизма представлены на рис. 2.

Массив западной части оз. Чудзьявр сложен поро-дами высокотемпературной амфиболитовой фации. РТ-условия их образования составляют $P = 3\text{--}5$ кбар, $T =$

710–790 °C [6]. Рассматриваемый участок расположен в юго-восточной части Кольско-Норвежского блока, ко-торый формировался в условиях пассивной континен-тальной окраины (рис. 3). По составу гранитоиды пред-ставлены главным образом тоналитами и трондьемита-ми, местами микроклинизированы и в этом случае соот-ветствуют гранитам и кварцевым монцонитам. Шлифы образцов амфиболитовой фации метаморфизма показан-ны на рис. 4.

Целью исследования является сравнение петро-физических характеристик пород пренит-пумпеллии-товой (Печенгский район) и амфиболитовой (район оз. Чудзьявр) фаций метаморфизма. Сравнение производи-лось по плотности, скорости распространения продоль-ных и поперечных волн, показателям упругой анизотро-пии и др. Для этой цели было отобрано по 6 образцов той и другой разновидности пород, из которых изготовлены шлифы и образцы в форме куба с ребром 2.5–3 см.

Методика

Вначале было выполнено петрографическое описа-ние и определен минеральный состав пород пренит-пум-пеллиитовой и амфиболитовой фаций (табл. 1). Затем ме-тодом Архимеда определили плотность пород. Скорости

Рис. 1. Карта метаморфических фаций Печенгской структуры [Петров, 1999] с участком отбора образцов: 1 — породы архейского фундамента, 2 — разрывные нарушения, 3 — гранитоиды, 4–8 — метаморфические зоны: 4 — пренит-пумпеллиитовая, 5 — хлорит-актинолитовая с пренитом, 6 — хлорит-актинолитовая, 7 — биотит-актинолитовая, 8 — эпидот-роговообманковая, 9 — место отбора образцов

Fig. 1. Map of metamorphic facies of the Pechenga structure [Petrov, 1999] with the sampling site. 1 — the Archaean basement rocks, 2 — rock fractures, 3 — granites, 4–8 — metamorphic zones: 4 — prehnite-pumpellyite, 5 — chlorite-actinolite with prehnite, 6 — chlorite-actinolite, 7 — biotite-actinolite, 8 — epidote-hornblende, 9 — the sampling site

Рис. 2. Шлифы образцов пренит-пумпеллиитовой фации: а) P-13-31-1; б) P-13-33-1а; в) P-13-34-1; д) P-13-35-1; е) P-13-36-1; ф) P-13-36-2

Fig. 2. Thin sections of the samples of prehnite-pumpellyite facies (r. Soukeryoki: а) P-13-31-1; б) P-13-33-1а; в) P-13-34-1; д) P-13-35-1; е) P-13-36-1; ф) P-13-36-2

Рис. 3. Схематическая геологическая карта участка Чудзьявр: 1 — дайки габбро-амфиболитов, 2 — тоналиты, эндербиты, 3 — гранат-биотитовые гнейсы

Fig. 3. Geological sketch map of the Chudzyavr area. 1 — dikes of gabbro-amphibolite, 2 — tonalite, enderbite, 3 — garnet-biotite gneiss

Рис. 4. Шлифы образцов амфиболитовой фации: к) CHU-10-02; м) CHU-10-03-1; н) CHU-10-08-1; р) CHU-10-11а; с) CHU-10-096; т) CHU-10-20-1

Fig. 4. Thin sections of the samples of amphibolite facies (Lake Chudzyavr): к) CHU-10-02; м) CHU-10-03-1; н) CHU-10-08-1; р) CHU-10-11а; с) CHU-10-096; т) CHU-10-20-1

распространения продольных и поперечных волн вычисляли с использованием акустополаризационного метода, представляющего собой аналог оптического поляризационного метода [3, 4]. В конструкции акустополарископа имеется поворотная платформа, на которой закрепляется образец. Прибор содержит излучатель и приемник чисто поперечных линейно-поляризованных ультразвуковых колебаний, гониометр и указатель угла поворота платформы. Датчики акустополарископа соединены с ультразвуковым дефектоскопом. Измерения осуществлялись на рабочей частоте прибора 1.2 МГц.

Перед измерениями образец устанавливали на поворотную платформу. На рабочие поверхности излучателя и приемника наносили контактную среду, хорошо проводящую сдвиговые волны. В процессе измерений электропривод поворачивает платформу в пределах полного

Таблица 1. Минеральный состав и структуры пород района р. Соукерйоки и массива оз. Чудзьявр
Table 1. The mineral composition and texture of rocks in the area of the river Soukeryoki and massif of Lake Chudzyavr

Номер образца Sample No.	Минеральный состав, % Mineral composition	Структура Texture	Определение породы Type of rocks
Пренит-пумпеллиитовая фация Prenite-pumpelliite facies			
P-13-31-1	Pl-43.3; Chl-16.1; Act-14.1; Qz-6; Phl-1.2; Ilm-2.8; Op-4.8; Ap-0.3; Srp-4.1; Cb-4.3	Мелкозернистая, массивная Small-grained, massive	Метадиабаз Metadiabase
P-13-33-1a	Pl-48.3; Chl-33.2; Qz-0.5; Phl-0.7; Ilm-2.6; Op-4; Ap-0.3; Srp-9; Cb-1.4	Мелкозернистая, массивная, габродиа- базовая, нерассланцованная Small-grained, massive, gabbrodiabase, non-foliated	Метагаббродиабаз Metagabbrodiabase
P-13-34-1	Pl-44.3; Chl-30; Qz-2.2; Phl-2.8; Ilm-2.8; Op-6.3; Ap-0.2; Srp-6; Ep-5; Cb-0.4	Средне-неравномерно-зернистая, мас- сивная, габбровая medium-grained, massive, gabbro	Метагаббро metagabbro
P-13-35-1	Pl-38.4; Chl-37.2; Qz-6.7; Ilm-4.2; Op-7.6; Ap-0.5; Srp-3; Cb-0.3; Пренит-2.1	Мелкозернистая, массивная Small-grained, massive	Метагаббродиабаз Metagabbrodiabase
P-13-36-1	Pl-44.1; Chl-14; Act-22.6; Phl-0.5; Ilm-4.3; Op-6.8; Ap-0.5; Srp-7; Cb-0.2	Мелкозернистая, массивная Small-grained, massive	Пироксеновый пикрит Pyroxene picrite
P-13-36-2	Pl-44.1; Chl-14; Act-22.6; Phl-0.5; Ilm-4.3; Op-6.8; Ap-0.5; Srp-7; Cb-0.2	Мелкозернистая, массивная Small-grained, massive	Метагаббро metagabbro
Амфиболитовая фация Amphibolite facies			
CHU-10-02	Оpx-(5-7); Bt-5; Pl-50; Qtz-35; Op-(3-5); Ap<1	Бластогранитная Blastogranitic	Эндербит Enderbite
CHU-10-03-1	Оpx-(10-12); Hbl-(3-5); Bt-(10-15); Pl-40; Qtz-25; Op-5; Ap<1	Бластогранитная, аллотриоморфнозер- нистая Blastogranitic, allotriomorphic	Эндербит Enderbite
CHU-10-08-1	Оpx-2; Сpx-5; Hbl-3; Bt-8; Op-2; Pl-55; Qtz-25; Ap<1	Гранобластовая, местами коррозийно- метасоматическая Granoblastic, in places – corrosional metasomatic	Эндербит Enderbite
CHU-10-11a	Сpx-10, Оpx-4, Bt-5, Hbl-2, Op-2, Pl-47, Qtz-30, Ap<1	Бластогранитная Blastogranitic	Эндербит Enderbite
CHU-10-096	Bt-15; Pl-54; Qtz-30; Op<1; Ap; Aln; Cal; Zr<1	Гранобластовая Granoblastic	Тоналит Tonalite
CHU-10-20-1	Bt-5; Pl-60; Qtz-35; Ap; Op<1	Бластогранитная Blastogranitic	Тоналит Tonalite

угла на 360° [5]. В точках наблюдений на экране ультразвукового прибора фиксировали амплитуду огибающей импульса проходящих колебаний.

Измерения проводили в два этапа: сначала при параллельных (ВП), затем — при скрещенных на 90° (ВС) векторах поляризации. Измерения выполняли на всех трех парах граней кубического образца. Для всех образцов были получены акустополариграммы, по которым определялась ориентировка проекций элементов упругой симметрии на трех гранях куба. Данные проекции являются направлениями, в которых скорости поперечных колебаний принимают экстремальные значения [4].

Петрофизические свойства образцов приведены в табл. 2. В ней представлены плотность, скорости V_{ij} , показатели анизотропии A_p и B_s . Результаты измерений величин скорости распространения продольных (V_p) и поперечных (V_s) колебаний по всем граням кубического образца приведены в виде квазиматрицы [4]:

$$V_{ij} = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

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

Показатели анизотропии вычисляли по формуле:

$$A_p = \frac{1}{V_{cp}} \cdot \sqrt{(V_{11} - V_{cp})^2 + (V_{22} - V_{cp})^2 + (V_{33} - V_{cp})^2}, \quad (2)$$

где $V_{cp} = (V_{11} + V_{22} + V_{33}) / 3$ — величина средней скорости распространения продольных колебаний в анизотропном образце.

Для оценки степени анизотропии образца по скорости поперечных колебаний рассчитывали обобщенный показатель анизотропии B_s . Величину B_s вычисляли по формуле [4]:

$$B_s = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2}, \quad (3)$$

$$\text{где } B_1 = \frac{2 \cdot (V_{12} - V_{13})}{(V_{12} + V_{13})}; B_2 = \frac{2 \cdot (V_{21} - V_{23})}{(V_{21} + V_{23})}; B_3 = \frac{2 \cdot (V_{31} - V_{32})}{(V_{31} + V_{32})}$$

коэффициенты двулучепреломления поперечных волн, определенных соответственно для направлений 1-1', 2-2', 3-3'. В табл. 2 также даны средние величины скорости продольной волны для образца, рассчитанные как $V_{PR} = (V_{11} + V_{22} + V_{33})/3$. Средние величины скорости поперечной волны определены как $V_{SR} = (V_{12} + V_{13} + V_{21} + V_{23} + V_{31} + V_{32})/6$.

Обсуждение результатов

Анализ акустополариграмм (рис. 5) образцов пренит-пумпеллитовой фации дает возможность предположить, что данные породы близки к квазиизотропным. На некоторых образцах акустополариграммы ВС минимальны и занимают область, близкую к началу координат, что не дает возможности определить направления элементов симметрии. В положении ВС зарегистрированы акустополариграммы малого размера за исключением

обр. Р-13-31-1 (границы 2-2' и 3-3'); Р-13-34-1 (границы 1-1' и 3-3'); Р-13-36-1 (границы 2-2' и 3-3'). Это подтверждает и вид текстуры пород (рис. 2). Она массивная, мелкозернистая, в основном без преимущественной направленности зерен, что также характеризует образцы как квазиизотропные. Образцы Р-13-34-1 (границы 2-2' и 3-3'), Р-13-36-1 (границы 2-2', 3-3') и Р-13-36-1 (все грани) показывают наличие эффекта ЛААП. Эффект ЛААП на образцах Р-13-34-1 и Р-13-36-1 может обуславливаться присутствием зерен значительно большего размера. На образце Р-13-36-2 имеется зона контакта, что также оказывает влияние на проявление эффекта ЛААП.

Анализ акустополариграмм образцов амфиболитовой фации (рис. 6) показывает наличие минимумов амплитуд на круговых диаграммах, полученных при скрещенных векторах поляризации (ВС), что указывает на присутствие элементов симметрии в строении образцов. Практически на всех представленных образцах: СНУ-10-02 (границы 1-1', 3-3'), СНУ-10-03-1 (все грани), СНУ-10-08-1 (границы 1-1', 2-2'), СНУ-10-09b (грань 3-3'), СНУ-

Рис. 5. Акустополариграммы пренит-пумпеллитовой фации (р. Соукерйюки). Синяя линия — векторы параллельны, красная — скрещены

Fig. 5. Acoustopolarigrams of prehnite-pumpellyite facies (r. Soukeryoki). Blue line — parallel vectors, red line — crossed vectors

Рис. 6. Акустополариграммы амфиболитовой фации (оз. Чудзьявр). Синяя линия — векторы параллельны, красная — скрещены

Fig. 6. Acoustopolarigrams of amphibolite facies (Lake Chudzyavr). Blue line — parallel vectors, red line — crossed vectors

10-20-1 (границы 1-1', 3-3') — имеется эффект линейной акустической анизотропии поглощения ЛААП, о чем свидетельствует уплощение на акустополариграммах, полученное при положении ВП.

На представленных образцах (CHU-10-02, CHU-10-09b, CHU-10-20-1) обнаружен эффект деполяризации сдвиговых волн (ДСВ), который характеризуется наличием аномально больших акустополариграмм, полученных при положении ВС [4]. Впервые эффекты ЛААП и ДСВ были обнаружены на образцах СГ-3 [7]. Наличие этих эффектов можно объяснить структурной неоднородностью образцов, направленной ориентировкой зерен минералов. Изломанность линий, очерчивающих акустополариграммы ВП и ВС, указывают на существенные внутренние неоднородности в строении образцов. Это подтверждается структурой шлифов образцов амфиболитовой фации (рис. 4). Например, шлиф образца CHU-10-02 показывает присутствие крупных мине-

ральных зерен с хаотичной ориентацией кристаллографических осей. Шлиф образца CHU-10-03-1 имеет более упорядоченную структуру, что и отражено на его акустополариграммах. Таким образом, акустополариграммы показывают степень упорядоченности или неупорядоченности структуры образца.

Сравнение петрофизических свойств фаций (табл. 2) показывает, что характер изменения экспериментально измеренной плотности (ρ_R) варьирует в пределах 2.59–3.03 г/см³ для пород пренит-пумпеллиитовой фации и 2.56–2.89 г/см³ для образцов амфиболитовой фации метаморфизма. Средние показатели плотности образцов пренит-пумпеллиитовой фации — (2.83 ± 0.2) г/см³ — выше, чем амфиболитовой — (2.67 ± 0.11) г/см³.

Обзор данных квазиматриц скорости V_{ij} показывает (табл. 2), что каждая из скоростных характеристик пород содержит определенную (детерминированную) и некоторую случайную (флуктуационную) составляющие.

Таблица 2. Петрофизические свойства образцов пренит-пумпеллиитовой и амфиболитовой фаций (экспериментальные и расчетные данные)
Table 2. Petrophysical properties of the samples of the prehnite-pumpellyite and amphibolite facies (experimental and calculated data)

Номер образца Sample No.	Наименование породы Rocks	Матрица скорости V_{ij} , км/с Velocity matrix	$A_p, \%$	$B_s, \%$	$\rho_R, \text{г/см}^3$	$\rho_C, \text{г/см}^3$	$V_{PR}, \text{км/с}$	$V_{PC}, \text{км/с}$	$V_{SR}, \text{км/с}$	$V_{SC}, \text{км/с}$
Пренит-пумпеллиитовая фация Prenite-pumpellyite facies										
P-13-31-1	Метадиабаз Metadiabase	6.40 3.27 3.25 3.87 6.32 4.21 3.60 3.61 5.93	5.6	8.4	2.63	2.90	6.22	6.18	3.64	3.41
P-13-33-1a	Габбродиабаз Gabbrodiabase	6.76 3.63 3.57 3.51 6.46 3.46 3.78 3.73 6.74	3.5	2.5	2.99	2.89	6.65	6.15	3.61	3.28
P-13-34-1	Габбро Gabbro	6.25 3.78 3.60 3.69 7.09 3.81 3.59 3.48 6.12	11.5	6.6	2.73	2.97	6.49	6.27	3.66	3.37
P-13-35-1	Габбродиабаз Gabbrodiabase	7.50 3.95 4.16 3.33 5.75 3.24 3.61 3.66 6.36	18.9	6.0	2.98	3.01	6.54	6.23	3.66	3.37
P-13-36-1	Пироксеновый пикрит Pyroxene picrite	6.25 3.61 3.47 3.44 6.57 3.49 3.51 3.53 6.53	3.8	4.1	3.03	2.99	6.45	6.44	3.51	3.49
P-13-36-2	Метагаббро Metagabbro	5.38 2.89 2.86 2.81 5.95 2.80 3.11 3.45 5.43	8.0	10.4	2.59	2.99	5.59	6.44	2.99	3.49
Среднее Average					2.83 ± 0.2	2.96 ± 0.1	6.33 ± 0.4	6.29 ± 0.2	3.52 ± 0.3	3.41 ± 0.1
Амфиболитовая фация Amphibolite facies										
CHU-10-02	Эндербит Enderbite	3.59 2.66 2.58 2.67 3.94 2.61 2.69 2.67 3.88	6.9	3.8	2.61	2.73	3.81	5.99	2.65	3.56
CHU-10-03-1	Эндербит Enderbite	4.12 2.99 2.84 2.76 4.22 2.82 2.96 2.85 4.16	1.7	6.7	2.67	2.83	4.17	6.08	2.87	3.56
CHU-10-08-1	Эндербит Enderbite	5.17 2.82 3.28 3.42 5.13 3.34 2.81 3.30 4.85	4.8	22	2.66	2.71	5.05	5.99	3.16	3.48
CHU-10-09b	Тоналит Tonalite	5.02 3.42 3.35 3.21 5.44 3.36 3.08 3.22 4.72	10.1	6.8	2.89	2.66	5.06	5.79	3.27	3.41
CHU-10-11a	Эндербит Enderbite	4.43 2.89 2.85 2.78 4.25 2.78 2.91 2.91 4.23	3.6	1.5	2.63	2.74	4.30	6.13	2.85	3.61
CHU-10-20-1	Тоналит Tonalite	4.81 3.22 3.10 3.24 4.88 3.09 3.09 3.09 4.56	5.0	6.1	2.56	2.62	4.75	5.84	3.14	3.46
Среднее Average					2.67 ± 0.11	2.72 ± 0.07	4.53 ± 0.47	5.97 ± 0.13	3.00 ± 0.22	3.52 ± 0.07

Наибольшие и наименьшие значения средней скорости распространения продольных колебаний (V_{PR}), замеренных в образцах в лабораторных условиях, изменяются в пределах 5.59–6.65 км/с для пренит-пумпеллиитовой и 3.81–5.06 км/с для амфиболитовой фаций. Скорости поперечных волн (V_{SR}), зарегистрированные в образцах в лабораторных условиях, варьируют в пределах 2.99–3.66 км/с (пренит-пумпеллиитовая) и 2.65–3.27 км/с (амфиболитовая фация).

Средние скорости продольных и поперечных волн образцов разных фаций показывают те же тенденции, что и средние плотности. Для пород пренит-пумпеллиитовой фации $V_{PR} = (6.33 \pm 0.4)$ км/с, $V_{SR} = (3.52 \pm 0.3)$ км/с. Породы амфиболитовой фации характеризуются меньшими величинами: $V_{PR} = (4.53 \pm 0.47)$ км/с, $V_{SR} = (3.00 \pm 0.22)$ км/с. Такая разница обусловлена тем, что породы амфиболитовой фации по сравнению с пренит-пумпеллиитовой проходят дополнительные стадии метаморфических преобразований. В породах образуются сугубо метаморфические минералы — амфибол, биотит и др. Под воздействием неоднородно распределенных РТ-условий возникают локальные структурные неоднородности, сопровождаемые внутри- и межзерновой пористостью.

Дополнительно к действиям этих факторов образцы пород, отобранные на земной поверхности, из-за влияния процессов выветривания и др. имеют более низкие плотностные и скоростные характеристики (ρ , V_P , V_S), чем те, которыми они обладают на глубинах 0.1–3 км. Этот диапазон глубин наиболее интересен для разведочной геофизики. В ряде работ показано, что различия в показателях ρ , V_P , V_S на этих глубинах определяются их минеральным составом [1, 2, 7, 8, 11]. Поэтому авторами выполнен расчет величин плотности и скорости распространения продольных и поперечных волн по минеральному составу породы. Расчеты выполнены по формуле [1]:

$$\ln V_k = \frac{\sum \ln V_i P_i}{\sum P_i}, \quad (4)$$

где V_k — средняя расчетная скорость в породе, V_i — средняя скорость в каждом минерале, P_i — парциальная доля минерала, составляющего породу.

В качестве исходных данных взят минеральный состав породы и соответствующие средние величины скорости в каждом конкретном минерале [1, 9]. Для рассчитанных по минеральному составу величины плотности (ρ_c) варьируют в пределах 2.89–3.01 г/см³ для пород пренит-пумпеллиитовой фации и 2.62–2.83 г/см³ для образцов амфиболитовой фации метаморфизма. Средние плотности для всей разновидности образцов пренит-пумпеллиитовой фации равны (2.96 ± 0.1) г/см³, амфиболитовой — (2.72 ± 0.07) г/см³. Рассчитанные плотности выше экспериментально измеренных, так как в первых не учитывается пористость, свойственная реальным образцам.

Пределы изменений расчетных величин скорости распространения продольных волн (V_{PC}) составляют 6.15–6.44 км/с для пород пренит-пумпеллиитовой фации и 5.84–6.13 км/с для амфиболитовой. Диапазон поперечных скоростей (V_{SC}), рассчитанных по минеральному составу, составляет 3.28–3.49 и 3.41–3.61 км/с соответственно. Средние расчетные скорости для всей разновидности образцов пренит-пумпеллиитовой фации равны (3.41 ± 0.1) км/с, амфиболитовой — (3.52 ± 0.07) км/с. Экспериментально измеренные и расчетные величины

продольных скоростей не различаются в пределах разброса данных. Некоторое различие наблюдается в значениях скорости поперечных волн. Для пород амфиболитовой фации величины расчетных скоростей существенно выше, чем экспериментальных. Наблюдается значительный разброс данных, измеренных экспериментально в образцах амфиболитовой фации. Рассчитанные продольные скорости пренит-пумпеллиитовой фации, как и плотности, выше расчетных для амфиболитовой.

Полученные величины коэффициентов упругой анизотропии показали (табл. 2), что образцы пород района р. Соукерйоки являются как слабо-, так и сильноанизотропными. Рассчитанные на основе скорости продольных волн коэффициенты изменяются в пределах $A_P = 3.6$ –19 %. Показатель, рассчитанный по скорости поперечных волн, варьирует в диапазоне $B_S = 2.5$ –10.3 %. Для образцов района оз. Чудзьявр эти показатели изменяются в пределах $A_P = 2.0$ –10.4 %, $B_S = 2.0$ –22 %.

На основе полученных скоростных характеристик были также рассчитаны технические постоянные: модуль упругости E , модуль сдвига G и коэффициент Пуассона ν . Эти показатели рассчитаны по формулам:

$$E = [\rho V_S^2 (3V_P^2/V_S^2 - 4)] / (V_P^2/V_S^2 - 1), \quad (5)$$

$$G = \rho V_S^2, \quad (6)$$

$$\nu = (V_P^2/V_S^2 - 2) / (2V_P^2/V_S^2 - 2). \quad (7)$$

Средние значения плотности, модулей упругости и сдвига, коэффициентов Пуассона для поверхностных и глубинных условий приведены в табл. 3. Эти параметры могут быть полезны для технических расчетов.

Таблица 3. Модули упругости и сдвига, коэффициенты Пуассона для пород районов р. Соукерйоки и оз. Чудзьявр
Table 3. Elasticity and shear moduli and Poisson's ratio for rocks in the areas of the river Soukeryoki and Lake Chudzyavr

Земная поверхность Earth surface				Глубинные условия Abyssal conditions			
ρ , г/см ³	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	$G \cdot 10^{-4}$, МПа	ν	ρ , г/см ³	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	$G \cdot 10^{-4}$, МПа	ν
Пренит-пумпеллиитовая фация Prenite-pumpelliite facies							
2.83 ±0.2	8.94 ±1.5	3.51 ±0.6	0.28 ±0.1	2.96 ±0.1	8.89 ±0.5	3.44 ±0.2	0.29 ±0.1
Амфиболитовая фация Amphibolite facies							
2.67 ±0.11	5.33 ±1.1	2.41 ±0.41	0.11 ±0.06	2.72 ±0.07	8.31 ±0.64	3.37 ±0.26	0.23 ±0.01

Закключение

Изучены петрофизические свойства метавулкани-тов материнской свиты Печенгской палеорифтогенной структуры и пород массива западной части оз. Чудзьявр. Метавулкани-ты Печенгской структуры (метадиабазы, габбро, габбродиабазы), метаморфизованные в условиях пренит-пумпеллиитовой фации, отличает сравнительно высокая однородность, им свойственна в среднем мелко-зернистая массивная структура. Это нашло отражение в очертаниях акустополариграмм. Диаграммы ВП близки к круговым, диаграммы ВС минимальны и занимают область, близкую к началу координат. Экспериментально измеренные и расчетные величины плотности, продольных скоростей не различаются в пределах разброса данных. Это свидетельствует о высокой сохранности пород, низком влиянии факторов (перемен тектонического давления и колебаний температуры) на их петрофизические свойства за прошедший геологический период.

Породы высокотемпературной амфиболитовой фации района оз. Чудзьявр — эндербиты, габбро, тоналиты, гранат-биотитовые гнейсы — обладают широким диапазоном изменчивости петрофизических свойств. Анализ акустополариграмм образцов амфиболитовой фации показывает наличие минимумов амплитуд на круговых диаграммах ВС, что говорит о присутствии элементов симметрии в строении образцов. Обнаружены проявления эффектов линейной акустической анизотропии поглощения и деполяризации сдвиговых волн, что можно объяснить структурной неоднородностью образцов, направленной ориентировкой зерен минералов. Для пород амфиболитовой фации показатели расчетных величин: плотности, скорости продольных и поперечных волн — выше, чем экспериментальных. Наблюдается значительный разброс данных, измеренных экспериментально. Такая разница в свойствах объясняется разной степенью выветрелости отобранных образцов. Породы этой фации проходят дополнительные стадии метаморфических преобразований. При этом образуются сугубо метаморфические минералы — амфибол, биотит и др. Под воздействием неоднородно распределенных РТ-условий возникают локальные структурные неоднородности, сопровождаемые внутри- и межзерновой пористостью. Рассчитанные скорости по минеральному составу следует относить к глубинным горизонтам земной коры. Им свойствен меньший диапазон изменения данных, они тесно связаны с минеральным составом. Упругая анизотропия — неперемное свойство метаморфических пород.

Из результатов исследования следует, что если при геодинамических процессах метавулканиды основного состава будут выведены на земную поверхность, то они сохраняют свои физические свойства. При этом свойства метаморфизованных гранитоидов массива оз. Чудзьявр существенно изменяются, в том числе из-за процессов выветривания. Заметим, что вычисленные скорости продольных (5.97 ± 0.13) км/с и поперечных (3.52 ± 0.07) км/с волн близки к данным лабораторных измерений у вулканидов основного состава — (6.33 ± 0.4) и (3.52 ± 0.3) км/с. Это, с одной стороны, создает трудности разделения пород пренит-пумпеллиитовой и амфиболитовой фаций методами глубинной сейсморазведки. Однако их можно различить по наличию упругой анизотропии в породах амфиболитовой фации. Конечно, это потребует более углубленной интерпретации результатов сейсмических работ.

Метод акустополарископии позволяет визуально различать породы пренит-пумпеллиитовой и амфиболитовой фаций метаморфизма. Полученные данные (плотности, скоростные характеристики, модули упругости и коэффициенты Пуассона) отражают реальные свойства пород массива и могут применяться при технических расчетах.

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований (гранты № 10-05-00082-а, 13-05-00125-а, 16-05-00026-а), при поддержке которого получена большая часть приведенных в статье результатов.

Литература

1. Беликов Б. П., Александров К. С., Рыжова Т. В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М.: Наука, 1970. 276 с.
2. Головатая О. С., Горбачевич Ф. Ф., Керн Х., Попп Т. Свойства некоторых пород из разреза Кольской сверхглубокой скважины при изменении РТ-параметров // Физика Земли. 2006. № 8. С. 1–12.
3. Горбачевич Ф. Ф. Акустополарископ для измерения упругости образцов твердых сред.: Авт. свид. СССР № 1281993 // Бюлл. изобр. 1987. № 1.
4. Горбачевич Ф. Ф. Акустополарископия горных пород. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1995. 203 с.
5. Ковалевский М. В. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol: Учеб. пособие: Апатиты: К&М, 2009. 54 с.
6. Петров В. П., Беляев О. А., Волошина З. М. и др. Эндогенные режимы метаморфизма раннего докембрия (северо-восточная часть Балтийского щита). Л.: Наука, 1990. 184 с.
7. Строение литосферы российской части Баренц-региона / Под ред. Н. В. Шарова, Ф. П., Митрофанова, М. Л. Вербы, К. Гиллена. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2005. 318 с.
8. Christensen N., Mooney W. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view // J. Geophys. Res. 1995. B7. No. 100. P. 9761–9788.
9. Kern, H., Mengel K., Strauss K. W., Ivankina T. I., Nikitin A. N., and 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.
10. Kretz R. Symbols for rock-forming minerals // Amer. Mineral. 1983. V. 68. P. 277–279.
11. Rudnick R. L., Fountain D. M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective // Rev. Geophysics. 1995. V. 33. P. 267–309.

References

1. Belikov, B. P., Aleksandrov, K. S. and Ryzhova, T. V. *Uprugie svoystva porodoobrazuyuschih mineralov i gornyh porod* (Elastic properties of rock-forming minerals and rocks). Moscow, Nauka, 1970, 274 pp.
2. Golovataya, O. S., Gorbachevich, F. F., Kern, H. and Popp, T. *Svoystva nekotorykh porod iz razreza Kol'skoi sverhglubokoi skvazhiny pri izmenenii RT-parametrov* (Properties of some rocks from the section of the Kola ultradeep borehole as a function of the P-T parameters). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2006, V. 42, No. 11, pp. 865–876.
3. Gorbachevich, F. F. *Akustopolaryiskop dlya izmereniya uprugosti obraztsov tverdykh sred* (Acoustopolariscope for the measurement of solid samples elasticity). Pat. USSR No. 1281993, Bull. No. 1, 1987.
4. Gorbachevich, F. F. 1995. *Akustopolaryiskopiya gornyh porod* (Acoustopolariscopy of rock samples). Apatity, Kola Sci. Centre RAS. 204 pp.
5. Kovalevskiy M. V. *Avtomatizirovanniy programmo-apparatnyi kompleks Acoustpol* (Automated software-hardware complex Acoustpol). Textbook, Apatity, K & M Publ, 2009, 54 pp.
6. Petrov V. P., Belyaev O. A., Voloshina Z. M. et al. *Endogennye rezhimy metamorfizma rannego dokembriya (severo-vostochnaya chast' Baltiiskogo schita)* (Endogenic regimes of Early Precambrian metamorphism (north-eastern Baltic Shield)). Leningrad, Nauka, 1990, 184 pp.
7. *Stroenie litosfery rossiiskoi chasti Barents-regiona* (The lithosphere structure of the Russian part of the Barents Region). Eds. N. V. Sharov, F. P. Mitrofanov, M. L. Verba and C. Gillen, Karelian Science Centre of RAS, Petrozavodsk. 2005, 318 pp.
8. Christensen N., Mooney W. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *J. Geophys. Res.* 1995. B7. No. 100, pp. 9761–9788.
9. Kern, H., K. Mengel, K. W. Strauss, T. I. Ivankina, A. N. Nikitin, and I. T. Kukkonen, 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, pp. 151–166.
10. Kretz R. Symbols for rock-forming minerals. *Amer. Mineral.* 1983, V. 68, pp. 277–279.
11. Rudnick R. L., Fountain D. M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Rev. Geophysics.* 1995, V. 33, pp. 267–309.