

УДК 534.6.550.311

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД РАЙОНА ОЗЕРА ЧУДЗЬЯВР

© 2015 г. Ф. Ф. Горбацевич, М. В. Ковалевский, В. Р. Ветрин, О. М. Тришина

Геологический институт КНЦ РАН, ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманской обл., 184209 Россия.
E-mail: gorich@geoksc.apatity.ru

Поступила в редакцию 17.02.2014 г.

Изучены петрофизические свойства образцов пород массива в районе оз. Чудзьявр. Породы высокотемпературной амфиболитовой и гранулитовой фаций – эндербиты, габбро, тоналиты, гранат-биотитовые гнейсы, обладают широким диапазоном изменчивости петрофизических свойств. Определены скорости распространения продольных и поперечных волн для пород, находящихся в глубинных условиях и на поверхности. Обнаружены широкие вариации показателей анизотропии ($A_p = 1.72\text{--}10.0\%$, $B_s = 1.53\text{--}22\%$).

Ключевые слова: порода, метаморфизм, скорость распространения продольных и поперечных волн, анизотропия.

Интерпретация результатов сейсмического зондирования метаморфических массивов верхней и средней коры значительно затруднена. Массивы метаморфических пород обладают сложной структурой, неоднородностями разного масштаба, структурной и текстурной анизотропией. В этом плане представляет интерес детальное изучение петрофизических свойств массива в районе западной части оз. Чудзьявр. Массив сложен породами высокотемпературной амфиболитовой и гранулитовой фаций. Их РТ-условия образования составляют $P = 3\text{--}5$ кбар, $T = 710\text{--}790$ °С [6]. Рассматриваемый участок – это юго-восточная часть Кольско-Норвежского блока, который формировался в условиях пассивной континентальной окраины. Плагиигранитоиды эндербитового состава в районе к юго-западу от оз. Чудзьявр картируются главным образом в виде двух полос, разъединяемых полосой гнейсов, в составе которых преобладают гранат-биотитовые и силлиманит-гранат-биотитовые, местами кордиеритсодержащие разновидности. Схематическая геологическая карта участка представлена на рисунке.

Породы метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации, смяты в сложные изоклинальные складки. По направлению с юга на север по профилю происходит смена эндербитов плагиигранитоидами, местами содержащими ксенолиты и останцы биотитовых и амфибол-биотитовых гнейсов. По составу гранитоиды представле-

ны главным образом тоналитами и трондьемитами, местами микроклинизированы и в этом случае соответствуют гранитам и кварцевым монцонитам.

Цель исследования – определение петрофизических характеристик пород района западной части оз. Чудзьявр, в том числе плотности и скорости распространения продольных и поперечных волн, показателей упругой анизотропии и др. Было отобрано 11 проб пород, из которых изготовлены шлифы и образцы в форме куба с ребром размером 2.5–3 см. Минеральный состав пород приведен в табл. 1. Плотность пород определяли методом Архимеда.

Скорости распространения продольных и поперечных волн определяли с использованием акустополаризационного метода, представляющего собой аналог оптического поляризационного метода, с помощью прибора акустополарископ [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

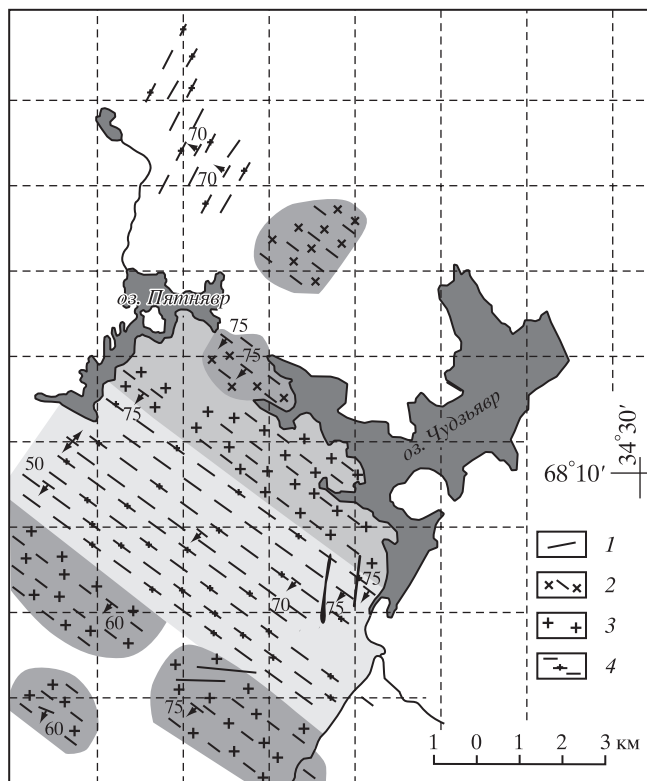


Рис. Схематическая геологическая карта участка Чудзьявр
1 – дайки габбро-амфиболитов, 2 – тоналиты, эндербиты,
3 – гранат-биотитовые гнейсы, 4 – места отбора образцов, в
скобках – величины возраста пород TNd(DM), млн. лет.

наносили контактную среду, хорошо проводящую сдвиговые волны. В процессе измерений электропривод поворачивает платформу в пределах полного угла поворота 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 акустопляриграммы, по которым определялась ориентировка проекций элементов упругой симметрии на трех гранях куба. Данные проекции являются направлениями, в которых скорости поперечных колебаний принимают экстремальные значения.

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

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

Таблица 1. Минеральный состав и структуры пород р-на оз. Чудзьявр

№№ шлифов	Минеральный состав, %	Структура	Определение породы
CHU-10-01a	Hbl-22, Cpx-20, Pl-50, Bt-5, Op-3, Ap<1	Гранобластовая	Метагаббро
CHU-10-016	Bt-2, Pl-68, Qtz-30, Op<1	Гипидиоморфнозернистая	Лейкотоналит
CHU-10-02	Opх-(5-7), Bt-5, Pl-50, Qtz-35, Op-(3-5), Ap<1	Бластогранитная	Эндербит
CHU-10-03-1	Opх-(10-12), Hbl-(3-5), Bt-(10-15), Pl-40, Qtz-25, Op-5, Ap<1	Бластогранитная, аллотриоморфнозернистая	Эндербит
CHU-10-07-1	Hbl-25, Bt-15, Sil-5, Pl-45, Op-10, Cal<1	Офитовая	Офитовое габбро
CHU-10-08-1	Opх-2, Cpx-5, Hbl-3, Bt-8, Op-2, Pl-55, Qtz-25, Ap<1	Гранобластовая, местами-коррозийно-метасоматическая	Эндербит
CHU-10-096	Bt-15, Pl-54, Qtz-30, Op<1, Ap, Aln, Cal, Zr<1	Гранобластовая	Тоналит
CHU-10-11a	Cpx-10, Opх-4, Bt-5, Hbl-2, Op-2, Pl-47, Qtz-30, Ap<1	Бластогранитная	Эндербит
CHU-10-12-1	Grt-15, Bt-8, Kfs-30, Pl-20, Qtz-25, Op-2, Zrn, Ap<1	Гранобластовая, порфирогранобластовая	Гранат-биотитовый гнейс
CHU-10-17	Bt-3, Opх<1, Pl-67, Qtz-30, Zo, Ap<1	Гранобластовая, аллотриоморфнозернистая	Лейкоэндербит
CHU-10-20-1	Bt-5, Pl-60, Qtz-35, Ap, Op<1	Бластогранитная	Тоналит

Примечание. Обозначение минералов дано по Kretz [9];

Таблица 2. Петрофизические свойства образцов массива оз. Чудзьявр (экспериментальные и расчетные данные)

Номер образца	Наименование породы	ρ , г/см ³	V_{ij} , км/с	A_p , %	B_s , %	V_{PR} , км/с	V_{PC} , км/с	V_{SR} , км/с	V_{SC} , км/с
CHU-10-01a	Метагаббро	3.00	5.17 3.29 3.30 3.25 5.37 3.37 3.27 3.27 5.14	3.31	3.52	5.22	6.36	3.29	3.51
CHU-10-016	Лейкотоналит	2.60	4.69 2.76 2.78 2.91 4.36 2.87 2.79 2.79 4.09	9.74	1.80	4.38	5.85	2.81	3.42
CHU-10-02	Эндербит	2.61	3.59 2.66 2.58 2.67 3.94 2.61 2.69 2.67 3.88	6.97	3.79	3.80	5.99	2.65	3.56
CHU-10-03-1	Эндербит	2.67	4.12 2.99 2.84 2.76 4.22 2.82 2.96 2.85 4.16	1.72	6.70	4.16	6.08	2.87	3.56
CHU-10-07-1	Офитовое габбро	2.81	5.12 3.17 3.34 3.01 4.83 3.26 3.11 3.19 5.02	4.19	9.65	4.99	6.12	3.18	3.41
CHU-10-08-1	Эндербит	2.66	5.17 2.82 3.28 3.42 5.13 3.34 2.81 3.30 4.85	4.80	22.09	5.05	5.96	3.16	3.47
CHU-10-096	Тоналит	2.89	5.02 3.42 3.35 3.21 5.44 3.36 3.08 3.22 4.72	10.05	6.83	5.06	5.77	3.27	3.39
CHU-10-11a	Эндербит	2.63	4.43 2.89 2.85 2.78 4.25 2.78 2.91 2.91 4.23	3.65	1.53	4.30	6.09	2.85	3.58
CHU-10-12-1	Гранат-биотитовый гнейс	2.55	5.54 3.33 3.49 3.22 5.30 3.47 3.14 3.22 5.22	4.38	9.39	5.35	6.17	3.31	3.63
CHU-10-17	Лейкоэндербит	2.58	4.64 2.93 3.09 2.92 4.47 3.12 3.00 3.20 4.51	2.77	10.54	4.54	5.84	3.04	3.42
CHU-10-20-1	Тоналит	2.56	4.81 3.22 3.10 3.24 4.88 3.09 3.09 3.09 4.56	5.04	6.13	4.75	5.84	3.14	3.46

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 (ОВП) 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 формулам

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

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

Таблица 3. Расчетные скоростные характеристики некоторых породообразующих минералов [1]

Название минерала	V_{pmin} км/с	V_{pmid} км/с	V_{pmax} км/с	V_{pmax}/V_{pmin}
Плагиоклаз	4.76	6.48	7.80	1.64
Гранат	8.51	8.51	8.51	1.00
Клинопироксен	7.29	7.91	8.51	1.17
Биотит	4.32	6.44	8.02	1.86
Кварц	5.75	6.06	6.35	1.1
Роговая обманка	6.05	7.19	7.91	1.31

обобщенный показатель анизотропии B_S . Величину B_S вычисляли по формулам [4]:

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

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

$$B_3 = \frac{2 \cdot (V_{31} - V_{32})}{(V_{31} + V_{32})} - \text{коэффициенты двулуче-}$$

преломления 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 $V_{SR} = (V_{12} + V_{13} + V_{21} + V_{23} + V_{31} + V_{32})/6$.

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 0.5–3 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, 10], поэтому авторами выполнен расчет величин скорости распространения продольных и поперечных волн по минеральному составу породы. В качестве исходных данных взят минеральный состав породы и соответствующие средние величины скорости в каждом конкретном минерале. Скоростные характеристики некоторых основных породообразующих минералов приведены в табл. 3. Расчеты выполнены по формуле [1]:

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

Обзор данных показывает, что каждая из скоростных характеристик пород содержит определенную (детерминированную) и некоторую случайную (флуктуационную) составляющие. Наибольшие и наименьшие значения средней скорости распространения продольных коле-

баний, замеренных в образцах в лабораторных условиях, изменяется в пределах 3.8–5.22 км/с. Для рассчитанных по минеральному составу эти пределы составляют 5.77–6.36 км/с. Скорости поперечных волн, зарегистрированные в образцах в лабораторных условиях, варьируют в пределах 2.65–3.29 км/с. Диапазон скоростей, рассчитанных по минеральному составу, составляет 3.39–3.63 км/с.

Полученные величины коэффициентов упругой анизотропии показали (см. табл. 2), что образцы пород района оз. Чудзъявр являются как слабо, так и сильно анизотропными. Рассчитанные на основе скорости продольных волн коэффициенты изменяются в пределах $A_p = 1.72$ –10.0%. Показатель, рассчитанный по скорости поперечных волн, варьирует в диапазоне $B_S = 1.53$ –22%. Следует отметить, что для метаморфизованных пород архейской части разреза Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) полученные значения A_p и B_S образцов находятся в более широком диапазоне изменений [7].

Кроме скоростных характеристик рассчитаны технические постоянные, модуль упругости E , модуль сдвига G и коэффициент Пуассона ν (табл. 4) Эти показатели рассчитаны по формулам

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

$$G = \rho V_S^2,$$

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

По данным табл. 4, пределы изменений модуля упругости, модуля сдвига и коэффициента Пуассона для поверхностных условий составляют $E = 3.76$ –7.61 · 10⁵ МПа, $G = 1.83$ –3.25 · 10⁵ МПа, $\nu = 0.026$ –0.204. Для глубинных условий эти показатели имеют значения $E = 7.48$ –9.47 · 10⁵ МПа, $G = 3.02$ –3.70 · 10⁵ МПа, $\nu = 0.23$ –0.28.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Породы высокотемпературной амфиболитовой и гранулитовой фаций района оз. Чудзъявр, – эндербиты, габбро, тоналиты, гранат-биотитовые гнейсы – обладают широким диапазоном изменчивости петрофизических свойств. Особенно это относится к образцам, находящимся в условиях земной поверхности. Скорее всего, такая разница в свойствах объясняется разной степенью выветрелости отобранных образцов. Тем не менее полученные данные (скоростные характеристики, модули упругости и коэффициенты Пуассона) отражают реальные свойства пород массива и могут применяться при технических расчетах. Рассчитанные скорости по минеральному составу следует относить к глубинным горизонтам земной

Таблица 4. Модули упругости и коэффициенты Пуассона образцов массива оз. Чудзьявр

Номер образца	Наименование породы	Земная поверхность			Глубинные условия		
		$E \cdot 10^5$, МПа	$G \cdot 10^5$, МПа	ν	$E \cdot 10^5$, МПа	$G \cdot 10^5$, МПа	ν
СНУ-10-01а	Метагаббро	7.61	3.25	0.17	9.47	3.70	0.28
СНУ-10-01б	Лейкотоналит	4.71	2.05	0.204	7.54	3.04	0.24
СНУ-10-02	Эндербит	3.76	1.83	0.026	8.12	3.31	0.23
СНУ-10-03-1	Эндербит	4.60	2.20	0.045	8.37	3.38	0.24
СНУ-10-07-1	Офитовое габбро	6.57	2.84	0.157	8.34	3.27	0.275
СНУ-10-08-1	Эндербит	6.26	2.66	0.177	7.96	3.20	0.24
СНУ-10-09б	Тоналит	7.05	3.09	0.093	8.21	3.32	0.236
СНУ-10-11а	Эндербит	4.75	2.14	0.108	8.33	3.37	0.235
СНУ-10-12-1	Гранат-биотитовый гнейс	6.64	2.79	0.189	8.29	3.36	0.234
СНУ-10-17	Лейкоэндербит	5.20	2.38	0.093	7.48	3.02	0.24
СНУ-10-20-1	Тоналит	5.61	2.52	0.112	7.53	3.06	0.23

коры. Им свойственен меньший диапазон изменения данных, они теснее связаны с минеральным составом. Упругая анизотропия – неперенное свойство метаморфических пород. Широкие вариации показателей анизотропии ($A_p = 1.72$ – 10.0% , $B_s = 1.53$ – 22%) свидетельствует о том, что интерпретация результатов сейсмического зондирования будет затруднена из-за появления эффекта двулучепреломления сейсмических лучей.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Акустополярископ для измерения упругости образцов твердых сред // Авт. свид. // СССР. № 1281993. Б.И. № 1, 1987.
4. Горбачевич Ф.Ф. Акустополярископия горных пород. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1995. 203 с.
5. Ковалевский М.В. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol: Учеб. пособие: Апатиты: Изд-во ООО “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. Строеение 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. Kretz R. Symbols for rock-forming minerals// Amer. Mineral. 1983. V. 68. P. 277–279.
10. 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.

PETROPHYSICAL PROPERTIES OF METAMORPHIC ROCKS FROM THE MASSIF IN THE LAKE CHUDZYAVR AREA

F. F. Gorbatsevich, M. V. Kovalevskiy, V. R. Vetrin, O. M. Trishina

Geological Institute, Kola Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Fersmana 14, Apatity, 184209 Russia. E-mail: gorich@geoksc.apatity.ru

Petrophysical properties of rock samples from the massif in the Lake Chudzyavr area have been studied. The rocks at high-temperature amphibolite and granulite facies – enderbites, gabbro, tonalite and garnet-biotite gneisses are characterized by a widely variable range of petrophysical properties. Compression and shear wave velocities for rocks under deep conditions and at the surface have been determined. A wide variation in the elastic anisotropy indices ($A_p = 1.72\text{--}10.0\%$, $B_s = 1.53\text{--}22\%$) has been revealed.

Keywords: *rocks, metamorphism, compression and shear wave velocities, anisotropy.*