

УДК 551.241+550.347.23

УПРУГО-АНИЗОТРОПНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД РАЗНОГО ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА И ФАЦИЙ МЕТАМОРФИЗМА СЕВЕРО-ВОСТОКА БАЛТИЙСКОГО ШИТА

© 2018 г. Ф.Ф. Горбачевич, О.М. Тришина, М.В. Ковалевский

Геологический институт Кольского научного центра РАН,
ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209 Россия.
E-mail: gorich@geoksc.apatity.ru

Поступила в редакцию 1.06.2017 г.

На примере пород, слагающих свиту матерт Печенгского комплекса в разрезе Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) и финской скважины Оутокумпу, массивов в окрестности оз. Чудзъявр и р. Тулома, ксенолитов из трубки взрыва (о. Еловый) изучены петрографические особенности, метаморфизм и физические свойства пород от пренит-пумпеллиитовой до гранулитовой фации. Изучение показало, что плотности пород возрастают от пренит-пумпеллиитовой до амфиболитовой фации (земная поверхность). Плотность пород в глубинных условиях увеличивается от пренит-пумпеллиитовой до гранулитовой фации. Самые низкие значения скорости продольных колебаний наблюдаются у пород эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фации (земная поверхность), что объясняется образованием вторичных метаморфических минералов и процессами выветривания. Величины скорости в глубинных условиях, как и плотность, проявляют тенденцию к росту от пренит-пумпеллиитовой до гранулитовой фации. Наиболее анизотропны породы амфиболитовой фации.

Ключевые слова: метаморфизм, фации, физические свойства пород, метод акустополарископии, Печенгский комплекс, Кольская сверхглубокая скважина, финская скважина Оутокумпу.

ВВЕДЕНИЕ

Интерпретация результатов глубинного сейсмического зондирования в метаморфизованных горных породах наталкивается на значительные трудности ввиду недостаточности знаний о петрофизических свойствах и параметрах анизотропии таких пород. Данные сейсмического зондирования очень часто отличаются от геологического разреза, построенного по результатам проходки скважин в массиве. Наиболее яркий пример такого несоответствия наблюдался на Кольской сверхглубокой скважине (СГ-3), до глубины 6842 м пересекающей палеопротерозойский осадочно-вулканогенный комплекс, и далее до забоя на глубине 12262 м – неоархейские породы фундамента Печенгской рифтогенной структуры [13, 14]. Причем, в разрезе СГ-3 с увеличением глубины наблюдается постепенный переход от пренит-пумпеллиитовой фации к амфиболитовой фации метаморфизма. Поэтому определенной проблемой является выявление изменчивости петрофизических, упруго-анизотропных параметров кристаллических пород в зависимости от

интенсивности их метаморфической переработки [21]. В известной схеме распределения метаморфических фаций в РТ-координатах пренит-пумпеллиитовая, эпидот-амфиболитовая, амфиболитовая, гранулитовая фация занимают отдельные области [3].

В северо-восточной части Балтийского щита выделены площадки, в пределах которых отобраны пробы метаморфизованных пород от пренит-пумпеллиитовой до гранулитовой фации. Конкретно, каменный материал для петрофизических исследований отбирался из метаморфизованных диабазов, габбро и габбродиабазов пренит-пумпеллиитовой (участок р. Соукер-йоки), зеленосланцевой (участки Шуони и Тульярв), эпидот-амфиболитовой (участок р. Валас-йоки), амфиболитовой (участок гор. Кучин-тундра) фаций, Печенгский комплекс. Породы амфиболитовой фации изучались на образцах из разреза Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3), массива, расположенном вблизи оз. Чудзъявр, участков вдоль р. Тулома, из разреза финской скважины Оутокумпу (ОКУ). Породы гранулитовой фации

исследовались на образцах гранатовых гранулитов из ксенолитов в трубке взрыва на о. Еловом. Составлялась петрохимическая характеристика пород, изготавливались шлифы, и по ним производилось определение минерального состава, петрографическое описание породы.

ОПИСАНИЕ ПОРОД

В районе верхнего течения р. Соукер-йоки, расположенном в северной части палеопротерозойской Печенгской палеорифтогенной структуры, отобраны образцы метавулканитов материнской свиты пильгуйярвинской серии, а также дайковых тел интрузивных пород – габбродиабазов, габбро. Метавулканиты метаморфизованы в пределах пренит-пумпеллиитовой фации ($T = 220\text{--}310\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 2.4\text{--}3.2$ кбар) [16]. Текстура вулканитов сланцеватая или массивная. К главным породообразующим минералам относятся плагиоклаз (38–48%), актинолит (до 22%), диопсид (14–37%); второстепенные и акцессорные: биотит, часто хлоритизированный, ильменит, ортоклаз, апатит, серпентин, кварц, карбонат.

Породы зеленосланцевой фации расположены в районе оз. Тульярв и среднего течения р. Шуони-йоки, в юго-восточной и западной частях Печенгской структуры. Они сформировались при $T = 340\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 2.8\text{--}4.9$ кбар [16]. Структуры метадиабазов гранобластовые, нематогранобластовые, местами аллотриоморфнозернистые, габбровые и панидиоморфные. Главные породообразующие минералы в образцах пород: 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.

Образцы эпидот-амфиболитовой фации ($T = 420\text{--}470\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 4.9\text{--}5.4$ кбар) отбирали на участке р. Валас-йоки [15]. Этот участок расположен в юго-восточной части Печенгской структуры. Породы в пределах участка представлены сланцеватыми амфиболитами, метаморфизованными в условиях эпидот-амфиболитовой фации. Структура амфиболитов нематогранобластовая, лепидогранобластовая, лепидонематогранобластовая, порфириовидная. Главные породообразующие минералы: плагиоклаз (51–40%), роговая обманка (17–30%), эпидот (10–21%); второстепенные и акцессорные: кварц, биотит, ильменит, ортоклаз, апатит, серпентин, карбонат.

В пределах района гор. Кучин-тундра (Печенгская структура) отобраны образцы амфиболитовой

фации метаморфизма ($T = 470\text{--}580\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 4.9\text{--}5.6$ кбар), преимущественно метагаббро и амфиболиты [18]. Рассланцованные амфиболиты и метагаббро представлены мелкозернистыми, равномернoзернистыми породами гранонематобластовой, нематобластовой, реликтовой габбровой, пойкилитовой структуры. Главные породообразующие минералы образцов амфиболитов: амфибол (60–98%), кварц и полевой шпат – 20–34%; до 5% занимают рудные минералы. Главные минералы образцов метагаббро – клинопироксен и плагиоклаз, их максимальное содержание в образцах – 30–35%. Количество новообразованных минералов (амфибол, биотит, карбонат) – 25–30%. До 5% занимает титанит, в качестве аксессуаров присутствуют рудные минералы (<1%).

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) находится на северо-западе Кольского полуострова, в северном обрамлении Печенгской структуры [13, 14]. Ее архейская часть разреза (диапазон глубин 6848–12261 м) сложена породами, метаморфизованными в пределах амфиболитовой фации ($T = 530\text{--}620\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 2.0\text{--}4.0$ кбар), и представлена в основном гнейсами, сланцами и амфиболитами [20]. Их структуры в основном гранобластовые, гипидиоморфнозернистые, аллотриоморфнозернистые. Согласно петрографическому описанию, преобладающий минерал в гнейсах – плагиоклаз (35–63%). Содержание второго по объему минерала – кварца, изменяется в пределах 20–35%, также присутствуют биотит, мусковит, микроклин и др. В составе большинства сланцев также преобладает плагиоклаз (15–77%). Однако в некоторых образцах существенную долю занимает роговая обманка (20–80%). Другие минералы – биотит, кварц, эпидот, занимают меньшую долю. В составе амфиболитов преобладает роговая обманка (50–89%). Также существенную долю в минеральном содержании занимает плагиоклаз (20–55%). Биотит, кварц, сфен, апатит, рудные минералы играют подчиненную роль.

Породы высокотемпературной амфиболитовой фации ($T = 700\text{--}790\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 3.2\text{--}5.0$ кбар) залегают в массиве, расположенном в районе западной части оз. Чудзьярв, который является составной частью Кольско-Норвежского блока Балтийского щита [17]. В массиве присутствуют следующие породные разновидности: биотитовые, амфибол-биотитовые и высокоглиноземистые гнейсы кольской серии, породы основного состава и разнообразные гранитоиды (гнейсо-плагиограниты, эндербиты, гнейсо-граниты и мигматиты) [8]. Структура пород гранобластовая, бластогранитная, гипидиоморфнозернистая. Их

главные породообразующие минералы – плагиоклаз (до 67%), кварц (20–35%), роговая обманка (2–25%). До 15% занимает биотит, в качестве аксессуаров присутствуют рудные минералы (<1%).

Другие породы высокотемпературной амфиболитовой фации ($T = 650–820\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 5.4–6.8\text{ кбар}$) метаморфизма находятся в центральной части Кольско-Норвежского блока (участок Тулома) [17]. В этом районе присутствуют все главные породные разновидности Кольско-Норвежского блока: плагиоамфиболиты, биотитовые, гранат-биотитовые и силлиманит-гранат-биотитовые гнейсы кольской серии, породы основного состава и гранитоиды (лейкограниты, тоналиты, эндербиты). Гранобластовая и порфирогранобластовая структуры преобладают. Основные породообразующие минералы гнейсов, лейкогранитов, эндербитов – плагиоклаз (15–56%), кварц (15–40%), роговая обманка (до 55%). В отдельных образцах биотит занимает до 30%, в качестве аксессуаров присутствуют апатит и рудные минералы (<5%).

Породы в разрезе исследовательской скважины Оутокумпу (ОКУ) также представляют высокотемпературную ($T = 600–630\text{ }^{\circ}\text{C}$) амфиболитовую фацию при очень высоком давлении ($P = 7.3–8.3\text{ кбар}$) [27, 28]. Скважина пробурена в 2005 г. в юго-западной части Финляндии и достигла предельной глубины 2516 м. По данным бурения, верхняя часть скважины до глубины 1310 м прошла через слюдястые сланцы с редкими прослоями биотитовых гнейсов. Интервал 1310–1515 м сложен перемежающимися слоями черных сланцев, биотитовых гнейсов, серпентинитов, диопсид-тремолитовых скарнов. Ниже 1515 м залегают слюдястые сланцы с редкими слоями черных сланцев и жилами кварца. Их структура лепидобластовая, бластопсаммитовая. Тела пегматитовых гранитов, перемежающиеся с гранат-биотитовыми гнейсами, биотит-силлиманитовыми сланцами слагают нижнюю часть вскрытого разреза до предельной глубины 2516 м. Слюдястые сланцы, гнейсы состоят из кварца (30–50%), плагиоклаза (15–40%), биотита и мусковита (20–40%); аксессуарные минералы: графит и апатит. Серпентиниты содержат тремолит и серпентин, а пегматиты состоят, в основном, из плагиоклаза и кварца.

Породы гранулитовой фации метаморфизма ($T = 700–930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 12–15\text{ кбар}$) обнаружены в трубке взрыва на острове Еловом Кандакшского архипелага [2]. Гранатовые гранулиты из этой трубки представляют собой среднезернистые породы, состоящие главным образом из

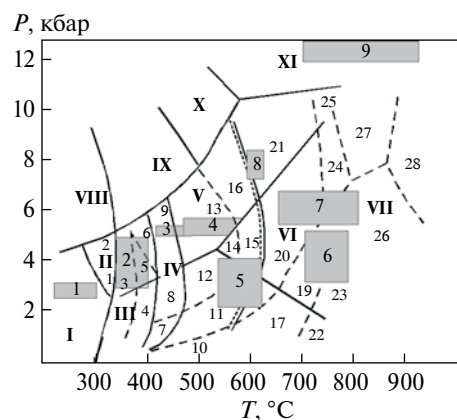


Рис. 1. Расположение участков исследуемых пород, метаморфизованных в условиях от пренит-пумпеллиитовой до амфиболитовой и гранулитовой фации, на схеме метаморфических фаций В.А. Глебовицкого [3]: 1 – р. Соукер-йоки (пренит-пумпеллиитовая); 2 – р. Шуони, оз. Тульявр (зеленосланцевая); 3 – р. Валас-йоки (эпидот-амфиболитовая); 4 – гор. Кучин-тундра (амфиболитовая); 5 – Кольская сверхглубокая скважина (амфиболитовая); 6 – оз. Чудзьявр (амфиболитовая); 7 – р. Тулома (высокотемпературная амфиболитовая); 8 – финская скважина Оутокумпу (высокотемпературная амфиболитовая); 9 – о. Еловый (гранулитовая).

граната (20–50%), клинопироксена (10–40%), плагиоклаза (15–50%), ромбического пироксена (0–25%) и представленные всеми переходными типами от мафических (эклогитовых) до фельзитических разновидностей. Содержание кварца, ортоклаза, скаполита и карбоната в ксенолитах не превышает 3–5% для каждого минерала. В аксессуарных количествах находятся апатит, циркон, монацит, рутил, эгирин и магнетит. Эти породы характеризуются гранобластовой равномерно-зернистой структурой. Расположение участков исследуемых пород на схеме метаморфических фаций представлено на рис 1.

МЕТОДИКА

Петрофизические измерения проводили на образцах кубической формы с размером ребра 2–3 см. Плотность пород определяли методом Архимеда. Определение скорости распространения продольных и поперечных волн производили с использованием акустополаризационного метода [5, 6, 12]. По этому методу определяли пространственное положение элементов упругой симметрии на всех трех парах граней образца. Затем в соответствии с выявленными направлениями осей и плоскостей упругой симметрии измеряли скорости распространения продольных и поперечных волн. Таким образом, на каждом

образце определяли три значения продольных и шесть значений скорости поперечных волн, представляемые в форме квазиматрицы:

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

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 (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 формуле:

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

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 [5]:

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

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'.

Средние величины скорости продольной и поперечной волны для образца рассчитывались по формуле:

$$V_{PR} = V_{cp}, V_{SR} = (V_{12} + V_{13} + V_{21} + V_{23} + V_{31} + V_{32}) / 6. \quad (4)$$

Обычно 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 у образцов, изъятых с глубин 0.1–3 км и глубже

[19, 25]. Этот диапазон глубин наиболее интересен для разведочной геофизики. В ряде работ показано, что различия в средних показателях (ρ , V_P , V_S), рассчитанных по минеральному составу и *in situ* на больших глубинах, различаются не более чем на 2–3% [22, 23, 1, 4]. Поэтому выполнен расчет величин плотности и скорости распространения продольных и поперечных волн по минеральному составу породы. В качестве исходных были взяты рассчитанные значения этих скоростей с учетом конкретного минерального состава породы. Расчеты выполнены по формуле [1]:

$$\ln V_k = \frac{\sum \ln V_i P_i}{\sum P_i}, \quad (5)$$

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. Соответственно, расчетные величины обозначены как V_{PC} , V_{SC} и ρ_C . В качестве исходных данных взят минеральный состав породы и соответствующие средние величины скорости в каждом конкретном минерале [1, 26].

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

$$E = [\rho V_S^2 (3V_P^2/V_S^2 - 4)] / (V_P^2/V_S^2 - 1), \quad (6)$$

$$G = \rho V_S^2, \quad (7)$$

$$\nu = (V_P^2/V_S^2 - 2) / (2V_P^2/V_S^2 - 2). \quad (8)$$

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сводные результаты изучения петрофизических свойств пород приведены в таблице. В ней представлены средние экспериментально измеренных и расчетных свойств пород разных фаций метаморфизма и разных участков: плотности, скорости распространения продольных и поперечных колебаний, показатели упругой анизотропии, а также результаты расчетов технических постоянных: модулей упругости и сдвига, коэффициентов Пуассона, являющихся производными от значений плотности и скорости соответствующих пород.

По данным определений породы прениит-пумпеллитовой фации (р. Соукер-йоки), – метадиабазы, габбро, габбродиабазы, характеризуются сравнительно высокой однородностью. Экспериментально

Сводные результаты изучения петрофизических свойств, модулей упругости и коэффициентов Пуассона образцов пород разных фаций метаморфизма

Метаморфизм, участок	РТ-условия, °С, кбар	Число образцов	Экспериментальные данные, определенные на образцах в лабораторных условиях			Расчетные данные, определенные по минеральному составу		Коэффициенты анизотропии		Земная поверхность			Глубинные условия			
			$\rho_R, \text{ г/см}^3$	$V_{PR}, \text{ км/с}$	$V_{SR}, \text{ км/с}$	$\rho_C, \text{ г/см}^3$	$V_{PC}, \text{ км/с}$	$V_{SC}, \text{ км/с}$	$A_p, \%$	$B_s, \%$	$E \cdot 10^{-4}, \text{ МПа}$	$G \cdot 10^{-4}, \text{ МПа}$	ν	$E \cdot 10^{-4}, \text{ МПа}$	$G \cdot 10^{-4}, \text{ МПа}$	ν
Пренит-пумпеллитовая фация, р. Соукер-йоки	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	8.97±1.41	3.51±0.56	0.277±0.020	8.86±0.46	3.43±0.18	0.293±0.006
Зеленосланцевая фация, оз. Тульяр, р. Шуони-йоки	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	9.17±0.98	3.60±0.40	0.275±0.009	9.06±0.33	3.52±0.20	0.290±0.007
Эпидот-амфиболитовая фация, р. Валас-йоки	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	7.13±1.36	3.05±0.37	0.162±0.091	10.52±1.14	4.12±0.07	0.278±0.007
Амфиболитовая фация, гор. 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	8.36±1.92	3.42±0.69	0.213±0.055	11.1±2.0	4.38±0.80	0.263±0.034
Амфиболитовая фация, Кольская СГ-3, архейская часть разреза, гнейсы	530–620, 2.0–4.0	6	2.65±0.02	3.22±1.11	1.89±0.40	2.66±0.10	6.10±0.07	3.56±0.03	–	–	1.77±0.47	0.99±0.46	–	8.34±0.05	3.35±0.04	0.241±0.112
–», сланцы	–», –»	6	2.88±0.10	3.59±1.35	1.93±0.26	2.91±0.14	6.43±0.41	3.65±0.20	–	–	2.73±0.73	1.11±0.32	0.231±0.156	9.88±1.52	3.92±0.59	0.260±0.020
–», амфиболиты	–», –»	6	3.07±0.04	3.53±0.80	1.97±0.48	2.97±0.10	6.72±0.14	3.77±0.08	–	–	2.99±1.32	1.25±0.63	0.227±0.125	10.75±0.69	4.23±0.27	0.269±0.013
Высокотемпературная амфиболитовая фация, оз. Чудзьярв	700–790, 3.2–5.0	15	2.67±0.13	4.77±0.52	3.11±0.23	2.74±0.11	6.01±0.16	3.50±0.08	7.6±7.8	8.0±5.8	5.87±1.25	2.61±0.50	0.12±0.10	8.37±0.70	3.37±0.30	0.242±0.166
Высокотемпературная амфиболитовая фация, р. Тулома	650–820, 5.4–6.8	17	2.76±0.19	4.51±0.98	2.78±0.44	2.81±0.15	6.11±0.54	3.57±0.22	13±11	12±7.6	5.28±2.22	2.22±0.82	0.169±0.084	8.96±1.58	3.62±0.58	0.236±0.033
Высокотемпературная амфиболитовая фация, скв. Оутокумпу	600–630, 7.3–8.3	16	2.79±0.13	4.59±0.78	2.92±0.37	2.74±0.22	5.88±0.54	3.47±0.33	26±16	22±16	5.47±1.71	2.31±0.64	0.178±0.094	5.99±2.06	3.38±0.91	0.228±0.073
Гранулитовая фация, о. Еловый	700–930, 12–15	15	2.84±0.18	6.36±0.32	3.74±0.25	3.10±0.24	7.00±0.39	3.97±0.30	2.8±1.2	3.5±2.0	9.96±1.68	4.08±0.78	0.225±0.40	12.30±2.77	4.95±1.13	0.260±0.015

Примечание: Образцы СГ-3 испытывали значительное разуплотнение, так как извлечены из глубин свыше 7500 м. Поэтому экспериментально измеренные скорости отражают лишь ту или иную степень этого разуплотнения и не пригодны для расчетов коэффициентов анизотропии.

измеренные и расчетные величины плотности, продольных скоростей не различаются в пределах разброса данных. Это свидетельствует о высокой сохранности пород, относительно низком влиянии внешних факторов (давления и температуры) на их петрофизические свойства за прошедший геологический период.

Для образцов пород зеленосланцевой фации (оз. Тульяр, р. Шуони-йоки), как и пренит-пумпеллиитовой, характерны высокие значения плотности. Их величины, измеренные и экспериментально рассчитанные по минеральному составу, одинаковы. Это свидетельствует о незначительной метаморфической переработке протолитов пород пренит-пумпеллиитовой и зеленосланцевой фаций. Сравнение скоростных данных пренит-пумпеллиитовой и зеленосланцевой фаций показывает, что средние расчетные скорости упругих колебаний в породах зеленосланцевой фации несколько выше. При этом средние скорости, измеренные для условий земной поверхности, практически одинаковы.

Существенная неоднородность строения проявляется в образцах эпидот-амфиболитовой фации (р. Валас-йоки). В отличие от пород пренит-пумпеллиитовой и зеленосланцевой фации, в образцах пород эпидот-амфиболитовой фации обнаруживается заметная разница между значениями скорости продольных и поперечных колебаний, измеренными экспериментально и рассчитанными по минеральному составу. Рассчитанные значения плотности равны экспериментально установленным, однако расчетные скорости выше экспериментально определенных.

В образцах амфиболитовой фации (гор. Кучин-тундра), как и эпидот-амфиболитовой фации, по сравнению с породами пренит-пумпеллиитовой и зеленосланцевой фаций существенно различаются значения скоростей продольных и поперечных колебаний, измеренных экспериментально и рассчитанных по минеральному составу. При этом рассчитанные плотности примерно равны экспериментально определенным. В целом, породы амфиболитовой фации подверглись существенной минеральной перестройке в процессе метаморфических преобразований. Кроме того, процессы выветривания оказали большое влияние на изменение петрофизических свойств образцов эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фации, отобранных на земной поверхности. Величины расчетных скоростей возрастают от пренит-пумпеллиитовой до амфиболитовой фации. Это связано с увеличением доли высокоскоростных минералов в более метаморфизованных породах.

Доминирующие породы архейской части разреза Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) – гнейсы, сланцы и амфиболиты, испытали метаморфизм амфиболитовой фации. Гнейсы, сланцы и амфиболиты различаются по плотности. У гнейсов она имеет сравнительно низкие значения, у амфиболитов – высокие. Экспериментально определенные значения плотности примерно равны рассчитанным. Рассчитанные величины скорости распространения продольных и поперечных волн значительно превышают экспериментально измеренные. Снижение экспериментально измеренных скоростей происходит из-за образования разгрузочных микротрещин, возникающих при извлечении образцов породы

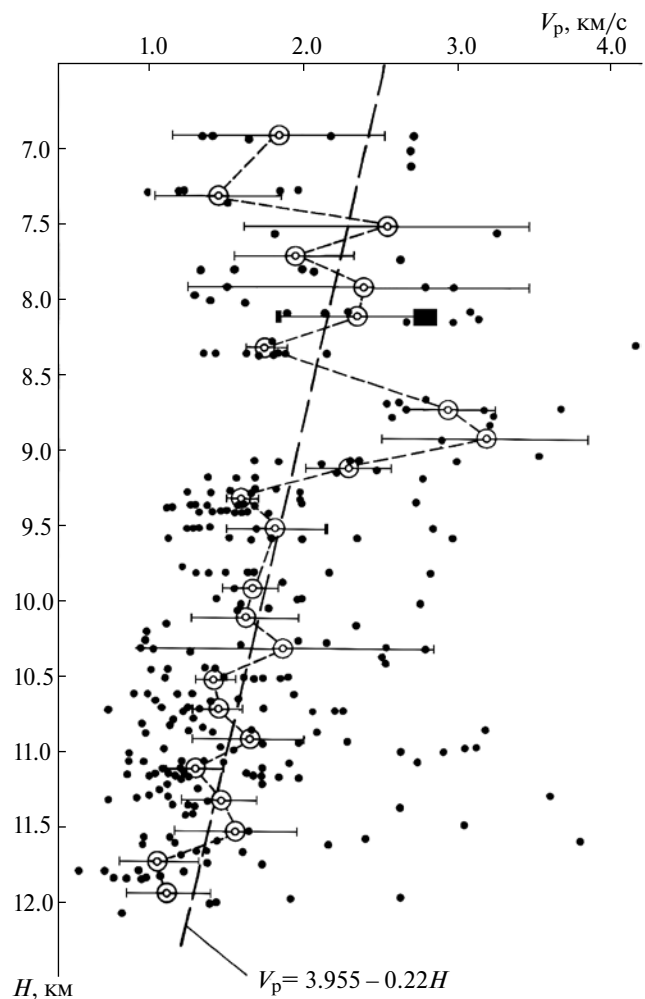


Рис. 2. Величины скорости продольных волн V_p в образцах гнейсо-гранитных пород архейской части разреза СГ-3 (6905–12050 м) [20]. Залитые точки – отдельные измерения, кружки – интервальные средние, отрезки прямых линий – диапазоны отклонений от среднего; пунктирная линия – тенденция изменения средних значений V_p с ростом глубины.

с больших глубин [9, 11, 24]. График зависимости величин скорости продольных волн от глубины извлечения образцов гнейсо-гранитных пород приведен на рис. 2. Он иллюстрирует практически линейное снижение величин скорости с глубиной. Таким образом, экспериментально измеренные скорости в образцах можно использовать для оценки глубины извлечения [10], но они значительно отличаются от тех, которые имеют место в массиве.

Породы района оз. Чудзьявр (габбро, тоналиты, эндербиты, гнейсы) формировались в условиях высокотемпературной амфиболитовой и гранулитовой фаций метаморфизма. Результаты изучения свойств пород района оз. Чудзьявр показали широкие вариации упругих свойств, существенную анизотропию. За счет большего объемного содержания низкоскоростных минералов, таких как плагиоклаз и кварц, расчетные скорости оказались ниже, чем в породах пренит-пумпеллиитовой и зеленосланцевой фаций. Эти породы отличаются от ранее рассмотренных большим диапазоном изменения петрофизических свойств.

Главные исследованные породные разновидности участка Тулома: плагиоамфиболиты, биотитовые, гранат-биотитовые и силлиманит-гранат-биотитовые гнейсы, породы основного состава и гранитоиды (лейкограниты, тоналиты, эндербиты), в целом, обладают еще большим разнообразием петрофизических свойств, чем породы района оз. Чудзьявр. При этом, средние значения плотности, скорости, как экспериментально измеренные, так и расчетные, сравнимы с породами района оз. Чудзьявр.

В высокометаморфизованных породах (сланцы, серпентиниты, граниты) из нижней части разреза скважины Оутокумпу отмечено снижение экспериментально определенных скоростей продольных и поперечных колебаний по сравнению с рассчитанными по минеральному составу. Эта разница объясняется влиянием слабовыраженного здесь эффекта разуплотнения кристаллических пород при их освобождении от литостатических напряжений, который наиболее ярко проявился на образцах ядра Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3), см. рис. 2.

Ксенолиты гранатовых гранулитов о. Еловый метаморфизованы в РТ-условиях гранулитовой фации (см. рис. 1). Образцы отличаются высокие значения плотности и скоростей упругих волн. Такие значения обусловлены высоким содержанием граната и пироксена. По характерным особенностям акустополяриграмм эти

породы похожи на диаграммы, полученные для пренит-пумпеллиитовой и зеленосланцевой фаций. То же относится и к величинам плотности и скорости распространения упругих волн, измеренных экспериментально. Сравнение акустополяриграмм ксенолитов, в которых преобладает гранат и пироксен, с акустополяриграммами пород с высоким содержанием плагиоклаза показал, что гранат- и пироксенсодержащие образцы существенно более однородны и изотропны [7]. Показано, что породы, содержащие большой процент граната и пироксена, не могут обладать высокой упругой анизотропией за счет того, что сами эти минералы слабоанизотропны.

В отличие от метаморфических пород, залегающих вблизи земной поверхности и в пределах первых километров земной коры, глубинные ксенолиты обладают слабой анизотропией. Показатели упругой анизотропии гранатовых гранулитов изменяются в довольно узких пределах. Слабая упругая анизотропия образцов указывает на то, что на глубинах, с которых извлечены данные ксенолиты, напряженное состояние пород близко к квазигидростатическому. Эти определения позволяют предположить, что вертикальная и горизонтальная компоненты поля палеонапряжений на больших глубинах (25–40 км) существенно не отличаются по величине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты изучения физических свойств широкого спектра метаморфических пород: метадиабазов, габбро, габбродиабазов, амфиболитов, гнейсов, сланцев, тоналитов, эндербитов, гранитов, серпентинитов, гранулитов, пироксенитов, метаморфизованных от пренит-пумпеллиитовой до гранулитовой фации, которые сравнительно часто слагают кристаллические массивы в земной коре. Выявлено, что на упругие характеристики пород, как правило, влияют встречающиеся в различных сочетаниях и степени проявления факторы: минеральный состав, структура, текстура, неоднородности, микротрещиноватость, упругая анизотропия, эффект линейной акустической анизотропии поглощения, явление деполяризации сдвиговых волн, процессы выветривания.

Изучение физических свойств пород разных фаций метаморфизма показало, что плотности пород возрастают от пренит-пумпеллиитовой до амфиболитовой фации (земная поверхность). Плотности пород гранулитовой и пренит-пумпеллиитовой фаций практически равны и ниже, чем у пород зеленосланцевой, эпидот-амфиболитовой

и амфиболитовой фаций. Плотность пород в глубинных условиях увеличивается от пренит-пумпеллиитовой до гранулитовой 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. Значения скоростей продольных колебаний, как и плотности, в глубинных условиях проявляют тенденцию к росту от пренит-пумпеллиитовой до гранулитовой фации. Такой же характер наблюдается в изменениях скорости распространения поперечных колебаний.

Упругая анизотропия пород пренит-пумпеллиитовой, зеленосланцевой, эпидот-амфиболитовой, амфиболитовой фаций метаморфизма существенно не отличается, что является довольно неожиданным результатом. Высокие показатели анизотропии отмечены у высокотемпературной амфиболитовой фации. В то же время гранатовые гранулиты, сформированные при очень высоких РТ-условиях, показали слабую упругую анизотропию. Это указывает на то, что на глубинах ~25–40 км напряженное состояние пород близко к квазигидростатическому.

Производные от плотности и скорости распространения продольных и поперечных колебаний, величины модулей упругости сохраняют те же тенденции при переходе от пренит-пумпеллиитовой к гранулитовой фации. Для пород эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фации (земная поверхность) зарегистрированы низкие значения коэффициента Пуассона, а для глубинных условий наблюдается постепенное уменьшение значений этого коэффициента от пренит-пумпеллиитовой до гранулитовой фации.

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

Авторы выражают искреннюю признательность В.Р. Ветрину и В.Ф. Смолькину за петрографическое описание пород и полезные консультации.

Работа выполнена по теме НИР № 0231-2015-0011 и при финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 13-05-00125-а, 16-05-00026-а.

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. Ветрин В.Р. Состав и строение нижней коры Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит) // Петрология. 2006. Т. 14. № 4. С. 442–465.
3. Глебовицкий В.А. Проблемы эволюции метаморфических процессов в подвижных областях. Л.: Наука, 1973. 127 с.
4. Головатая О.С., Горбацевич Ф.Ф., Керн Х., Попп Т. Свойства некоторых пород из разреза Кольской сверхглубокой скважины при изменении РТ – параметров // Физика Земли. № 11. 2006. С. 1–12.
5. Горбацевич Ф.Ф. Акустополярископия горных пород. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1995. 203 с.
6. Горбацевич Ф.Ф. Акустополярископия породообразующих минералов и кристаллических пород. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. 140 с.
7. Горбацевич Ф.Ф., Ветрин В.Р., Тришина О.М., Ковалевский М.В. Результаты экспериментального изучения упруго-анизотропных свойств гранатовых гранулитов нижней коры Беломорского подвижного пояса // Физика Земли. № 1. 2012. С. 82–96.
8. Горбацевич Ф.Ф., Ковалевский М.В., Ветрин В.Р., Тришина О.М. Петрофизические свойства метаморфических пород района озера Чудзъявр // Геоэкология. 2015. № 1. С. 67–72.
9. Горбацевич Ф.Ф., Медведев Р.В. Механизм разуплотнения кристаллических пород при их разгрузке от напряжений. Рудные геофизические исследования на Кольском полуострове. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1986. С. 83–89.
10. Горбацевич Ф.Ф., Савченко С.Н. Современные напряжения в северной части Балтийского щита по данным исследований печенгского геоблока и разреза Кольской сверхглубокой скважины // Геофизический журнал. 2009. Т. 31. № 6. С. 42–54.
11. Горяинов П.М., Давиденко И.В., Горбацевич Ф.Ф., Ланев В.С., Медведев Р.В., Смирнов Ю.П. Теоретические и экспериментальные основы тектоно-кессонного эффекта (явления дезинтеграции), геодинамические следствия. Глубинное строение и геодинамика кристаллических щитов Европейской части СССР / Под ред. Ф.П. Митрофанова, В.И. Болотова. Апатиты: Изд-во КНЦ АН СССР. 1992. С. 136–144.
12. Ковалевский М.В. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol: Учеб. пособие: Апатиты: Изд-во ООО «К & М», 2009. 54 с.
13. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины / Под ред. Козловского Е.А. М.: Недра, 1984. 490 с.
14. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследования / Под ред. В.П. Орлова и Н.П. Лаверова. М.: Технонефтегаз, 1998. 260 с.

15. Магматизм, седиментогенез и геодинамика Печенгской палеорифтогенной структуры / Под ред. Ф.П. Митрофанова, В.Ф. Смолькина Апатиты: КНЦ РАН, 1995. 258 с.
16. Петров В.П. Метаморфизм раннего протерозоя Балтийского щита. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1999. 325 с.
17. 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.
18. Смолькин В.Ф. Коматиитовый и пикритовый магматизм раннего докембрия Балтийского щита. СПб.: Наука, 1992. 272 с.
19. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. М.: Недра, 1975. 279 с.
20. Структура, свойства, состояние пород и геодинамика в геопространстве Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) / Под ред. Ф.Ф. Горбачевича / СПб.: Наука. 2015. 366 с.
21. Фации регионального метаморфизма Кольского полуострова. Л.: Наука, 1977. 88 с.
22. Christensen, N. and Mooney, W. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view // J. of Geophys. Res. 1995. 100 (B6). P. 9761–9788.
23. Emmermann R. and J. Lauterjung, 1997. The German Continental Deep Drilling Program KTB: Overview and major results // J. Geophys. Res. 102 (B8). P. 18179–18201.
24. Gorbachevich F. F. Decompaction mechanism of deep crystalline rocks under stress relief // Tectonophysics. 2003. V. 370. Issues 1–4. P. 121–128.
25. Kern H., Popp T., Gorbachevich F., Zharikov A., Lobanov K. V. and Smirnov Yu. P. Pressure and temperature dependence of V_p and V_s in rocks from the superdeep well and from surface analogues at Kola and the nature of velocity anisotropy // Tectonophysics. 2001. V. 338. P. 113–134.
26. Kern H., 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. P. 151–166.
27. Kukkonen I. T., Ed. Outokumpu. Deep Drilling Project 2003–2010. Geological Survey of Finland, Special Paper 51. Espoo. 2011. 252 p.
28. Kukkonen I. T., and the Outokumpu. Deep Drilling working group. Outokumpu deep drilling project – Introduction to Geology and Geophysics of the Deep Hole and Research Within the Project: Third International Workshop Espoo, Finland, November 12–13, 2009. Espoo. Geological Survey of Finland. Report Q10.2/2009/61. 2009. P. 11–16.
2. Vetrin, V.R. Composition and structure of the lower crust of the Belomorian mobile belt (Baltic Shield), *Petrologiya*, 2006, V. 14. no. 4, pp. 442–465 (in Russian).
3. Glebovitsky, V.A. *Problemy evolutsii metamorficheskikh protsessov v podvizhnykh oblastiakh* [Evolution aspects of metamorphic processes in mobile regions]. Leningrad, Nauka Publ., 1973, 127 p. (in Russian).
4. Golovataya, O.S., Gorbachevich, F.F., Kern, H., Popp, T. 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, vol. 42, no. 11, pp. 865–876 (in Russian).
5. Gorbachevich, F.F. Acoustopolariscopy of minerals and rocks. Saabruken, VDM Verlag, 2009. 144 p.
6. Gorbachevich, F.F. *Akustopolariskopiya porodoobrazuyushchikh mineralov i kristallicheskikh porod* [Acoustopolariscopy of rock-forming minerals and rocks]. Apatity. *Izdatel'stvo Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2002, 140 p. (in Russian).
7. Gorbachevich, F.F., Vetrin, V.R., Trishina, O.M., Kovalevskiy, M.V. Results of an experimental study of elastic-anisotropic properties of garnet granulites of the lower crust of the Belomorian mobile belt. *Fizika Zemli*, 2012, no. 1, pp. 82–96 (in Russian).
8. Gorbachevich, F.F., Kovalevskiy, M.V., Vetrin, V.R., Trishina, O.M. Petrophysical properties of metamorphic rocks in the Lake Chudzjavr area. *Geokhronologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya*, 2015, no. 1, pp. 67–72 (in Russian).
9. Gorbachevich, F.F., Medvedev, R.V. The mechanism of decompaction of crystalline rocks under stress relief. *Rudnye geofizicheskie issledovaniya na Kol'skom poluostrove*. [Ore geophysical studies on the Kola Peninsula]. Apatity. *Izdatel'stvo Kol'skogo filiala AN SSSR*, 1986, pp. 83–89 (in Russian).
10. Gorbachevich, F.F., Savchenko, S.N. Current stresses in northern Baltic Shield according to the research data for the Pechenga geoblock and the Kola superdeep borehole section. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 2009, V. 31, no. 6, pp. 42–54 (in Russian).
11. Goryainov, P.M., Davidenko, I.V., Gorbachevich, F.F., Lanev, V.S., Medvedev, R.V., Smirnov, Yu.P. Theoretical and experimental foundations of the tectonic-caisson effect (disintegration phenomena), geodynamic consequences. *Glubinoe stroenie i geodinamika kristallicheskih schitov Evropeyskoi chasti SSSR* [Deep structure and geodynamics of the crystalline shields of the European part of the USSR]. F. P. Mitrofanov V.I. Bolotov, Eds. Apatity. *Izdatel'stvo Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 1992, pp. 136–144 (in Russian).
12. Kovalevskiy, M. V. *Avtomatizirovanniy programmno-apparatnyi kompleks Acoustpol: Tutorial* [The automated software and hardware complex Acoustpol: Tutorial]. Apatity, *Izdatel'stvo «K & M»*, 2009, 54 p. (in Russian).
13. The super-deep well of Kola Peninsula. Ye.A. Kozlowski, Ed. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1987, 558 p.
14. *Kol'skaya Sverhglubokaya. Nauchnye rezul'taty i opyt issledovaniya* [Kola Superdeep. Scientific Results and

REFERENCES

- Research Experience]. V.P. Orlov, N.P. Laverov, Eds., Moscow, *Tekhnoneftegaz*, 1998, 260 p. (in Russian).
15. *Magmatism, sedimentogenez i geodinamika Pechengskoi palaeoriftogennoi struktury* [Magmatism, sedimentogenesis and geodynamics of the Pechenga palaeorift structure], F.P. Mitrofanov, V.F. Smolkin, Eds. Apatity. Izdatel'stvo Kol'skogo filiala AN SSSR, 1995, 258 p. (in Russian).
 16. Petrov, V.P. *Metamorphism rannego proterozoya Baltiiskogo shchita* [Metamorphism of the Early Proterozoic of the Baltic Shield]. Apatity, Izdatel'stvo Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN, 1999, 325 p. (in Russian).
 17. Petrov, V.P., Belyaev, O.A., Voloshina, Z.M. *Endogennyye regimy metamorfizma rannego dokembriya (severo-vostochnaya chast' Baltiiskogo shchita)* [Endogenous regimes of metamorphism of the Early Precambrian (the northeastern Baltic Shield)]. Leningrad. Nauka Publ., 1990, 184 p. (in Russian).
 18. Smol'kin, V.F. *Komatiitovyyi i pikritovyyi magmatizm rannego dokembriya Baltiiskogo shchita* [Komatiitic and picritic magmatism of the Early Precambrian of the Baltic Shield]. St.-Petersburg, Nauka Publ., 1992, 272 p. (in Russian).
 19. *Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornykh porod* [Handbook (cadastre) of physical properties of rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 279 p. (in Russian).
 20. *Struktura, svoystva, sostoyaniye porod i geodinamika v geoprostranstve Kol'skoi sverhglubokoy skvazhiny (SG-3)* [Structure, properties, state of rocks and geodynamics in the geospace of the Kola superdeep borehole (SG-3)] F.F. Gorbatshevich, Ed. SPb, Nauka Publ., 2015, 366 p. (in Russian).
 21. *Fatsii regional'nogo metamorfizma Kol'skogo poluostrova* [Facies of regional metamorphism of the Kola Peninsula]. Leningrad, Nauka Publ., 1977, 88 p. (in Russian).
 22. Christensen, N. and Mooney, W. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *J. of Geophys. Res.*, 1995, vol. 100 (B6), pp. 9761–9788.
 23. Emmermann, R., Lauterjüng, J. The German continental deep drilling program KTB: Overview and major results. *J. Geophys. Res.*, 1997, vol. 102 (B8), pp. 18179–18201.
 24. Gorbatshevich, F.F. Decompression mechanism of deep crystalline rocks under stress relief. *Tectonophysics*. 2003, vol. 370, issues 1–4, pp. 121–128.
 25. Kern, H., Popp, T., Gorbatshevich, F., Zharikov, A., Lobanov, K.V., Smirnov, Yu.P. Pressure and temperature dependence of Vp and Vs in rocks from the superdeep well and from surface analogues at Kola and the nature of velocity anisotropy. *Tectonophysics*, 2001, vol. 338, pp. 113–134.
 26. Kern, H., Mengel, K., Strauss, K.W., Ivankina, T.I., Nikitin, A.N., 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, vol. 175, pp. 151–166.
 27. Kukkonen, I.T. and the Outokumpu deep drilling working group. Outokumpu deep drilling project – Introduction to geology and geophysics of the deep hole and research. Within the project: Third international workshop Espoo, Finland, November 12–13, 2009. Espoo. *Geological survey of Finland*. Report Q10.2/2009/61, 2009, pp. 11–16.
 28. Kukkonen, I.T., Ed. Outokumpu deep drilling project 2003–2010. Espoo. *Geological survey of Finland*, Special Paper 51, 2011, 252 p.

ELASTIC-ANISOTROPIC PROPERTIES OF ROCKS OF DIFFERENT COMPOSITION AND METAMORPHIC FACIES IN THE NORTHEAST OF BALTIC SHIELD

F.F. Gorbatshevich, O.M. Trishina, M.V. Kovalevskii

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

Using rocks composing the Matert Fm of the Pechenga complex in the sections of the Kola superdeep borehole (SG-3) and the Finnish borehole Outokumpu, massifs in the vicinities of Lake Chudzjavr and the River Tuloma, xenoliths from the volcanic pipe (Elovy Island) as an example, petrographic features, metamorphism and physical properties of rocks from the prehnite-pumpellyite to the granulite facies were studied. The study showed that the rock densities increase from the prehnite-pumpellyite to the amphibolite facies (Earth's surface). The density of rocks under deep conditions increases from the prehnite-pumpellyite to the granulite facies. The lowest velocities of compression waves are observed in rocks of the epidote-amphibolite and amphibolite facies (Earth's surface). This can be explained by formation of secondary metamorphic minerals and weathering processes. Velocities as well as densities under deep conditions tend to increase from the prehnite-pumpellyite to the granulite facies. Rocks of the amphibolite facies are most anisotropic.

Key words: *metamorphism, facies, physical properties of rocks, acoustopolariscopy method, Pechenga complex, Kola superdeep borehole, Finnish Outokumpu drill hole.*