



ГОРБАЦЕВИЧ Ф.Ф. (Геологический институт, Кольский Научный Центр Российской Академии Наук, г. Апатиты)

ТРИШИНА О.М. (Геологический институт, Кольский Научный Центр Российской Академии Наук, г. Апатиты)

КОВАЛЕВСКИЙ М.В. (Геологический институт, Кольский Научный Центр Российской Академии Наук, г. Апатиты)

НЕКОТОРЫЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСНОВНЫХ ПОРОД АРХЕЙСКОЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА КОЛЬСКОЙ СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ СГ-3

Целью публикации является представление результатов исследований величины плотности и скорости в образцах основных пород архейской части Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3), пройденной в северном обрамлении Печенгской палеорифтогенной структуры.

Преобладающая часть пород архейского разреза СГ-3 представлена гнейсами, сланцами, амфиболитами. Их главными породобразующими минералами являются плагиоклаз, роговая обманка, слюды, кварц. Текстура пород в основном среднезернистая, структура – нематогранобластовая, лепидогранобластовая. Выполнена оценка упругой анизотропии и направленности структуры пород методом акустополарископии, проведены определение плотности, скорости продольных и поперечных волн в лабораторных условиях и расчет перечисленных характеристик по минеральному составу. Измеренные на образцах скорости имеют необычно низкую величину, которая объясняется эффектом разуплотнения глубинных пород. Значения скоростных характеристик, близкие к условиям глубинного залегания породы, получены расчетом с учетом их конкретного минерального состава. Средние значения скоростей продольных и поперечных волн у гнейсов, рассчитанных по минеральному составу, составили $6,38 \pm 0,16$ км/с, поперечной – $3,52 \pm 0,14$ км/с. Для сланцев средняя продольной скорости равна $6,40 \pm 0,13$ км/с, поперечной – $3,46 \pm 0,09$ км/с. Средние значения скорости продольных и поперечных волн для амфиболитов равны: $6,84 \pm 0,13$ км/с и $3,82 \pm 0,08$ км/с соответственно. Соотношения величин модулей сжатия и сдвига у разных пород проявляют те же тенденции, что и средние скорости. Однако их величины меньше у сланцев, средние у гнейсов, большие у амфиболитов.

Экспериментальные данные, полученные на образцах, извлеченных из глубины в несколько километров, непосредственно не могут быть использованы для оценки скоростных характеристик пород. Близкие значения продольных и поперечных скоростей в породах на глубине можно получить расчетным методом, используя данные по минеральному составу. Большой объем информации о свойствах пород можно получить, применяя акустополаризационный метод исследований.

Ключевые слова: Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3), глубинные породы, свойства, плотности, скорости продольных и поперечных волн.

Введение

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) находится на северо-западе Кольского полуострова, в северном обрамлении Печенгской структуры, рис. 1 [1].

Координаты устья скважины $69^{\circ}25'$ СШ и $30^{\circ}44'$ ВД. Она пройдена в северном крыле Печенгской геосинклинали, сложенной ритмично переслаиваемыми вулканогенными и туфогенно-осадочными толщами, простирающимися на СЗ $300\text{--}310^{\circ}$ и падающими на ЮЗ под углами $30\text{--}50^{\circ}$. Геологический разрез скважины СГ-3 опережающим стволом достиг отметки 12 262 м [2].

Скважина вскрыла два комплекса пород: протерозойский (0–6842 м) и архейский (6842–12 262 м). Протерозойский комплекс сложен вулканогенными и осадочными породами в соотношении 3 : 1 [2]. Архейский комплекс представлен I – толщей гнейсов с высокоглиноземистыми минералами (ВГМ), II – толщей гнейсов с высококальциевыми минералами (ВКМ), амфиболитов и тeneвых мигматитов, III – толщей гнейсов с ВГМ, IV – толщей гнейсов с ВКМ, амфиболитов и тeneвых мигматитов, V – толщей гнейсов с ВГМ, VI – толщей гнейсов с ВКМ, амфиболитов и тeneвых мигматитов, VII – толщей гнейсов с ВГМ, VIII – толщей

амфиболовых гнейсов, амфиболитов и теневого мигматитов, IX – толщей гнейсов с ВГМ, X – толщей биотит-плагиоклазовых гнейсов с ВКМ и вкрапленностью магнетита.

Как следует из вышеприведенных данных, архейская часть разреза СГ-3 сложена очень широким спектром пород от ультраосновного до кислого составов разной степени переработки, метаморфизованности, структурных и текстурных особенностей. Это указывает на возможные широкие вариации физических свойств слагающих пород. Изучение петрофизических свойств пород архейской части разреза представляет особый интерес, так как при извлечении керна из больших глубин в породе происходят необратимые изменения, связанные с механизмом внутреннего разуплотнения [3]. Согласно этому механизму в образцах глубинных пород, вынесенных на земную поверхность, за счет разницы в коэффициентах расширения у разных минералов на границе минеральных зерен происходит образование разгрузочных микротрещин. Это снижает величины таких характеристик, как плотность, и в особенности скорости распространения продольных и поперечных волн.



Рис. 1. Расположение Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3)

С целью выявить значения плотности, скоростей распространения продольных и поперечных волн, близкие к тем, которые имеют место на месте залегания,

из диапазона глубин 7263–11 487 м были отобраны 20 образцов керна основных пород Кольской сверхглубокой скважины СГ-3. Отобранные образцы представлены в основном гнейсами, сланцами, амфиболитами.

Методика

Вначале по шлифам было выполнено петрографическое описание пород и определен их минеральный состав. Затем методом Архимеда определили плотность пород. Определение скоростей распространения продольных и поперечных волн производили с использованием акустополаризационного метода, который выполняется с помощью прибора акустополарископа [4, 5]. 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 угла поворота 360° [6]. В точках наблюдений на экране ультразвукового прибора фиксировали амплитуду огибающей импульса проходящих колебаний [5].

Измерения проводили в два этапа: сначала при параллельных (ВП), затем при скрещенных на 90° (ВС) векторах поляризации, и выполняли на всех трех парах граней кубического образца (рис. 2).

По акустополариграммам ВП определяют наличие и степень проявления эффекта линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП) [5]. Эффект ЛААП выявляется при уплощении диа-

грамм, полученных при положении ВП векторов поляризации. Это означает, что в одном направлении векторов поляризации относительно структурных элементов среды поперечная волна распространяется с малым поглощением. Однако при повороте этих векторов в положение по нормали к направлению наибольшего пропускания (при амплитуде A_{RE}) волна значительно поглощается. При этом ее амплитуда становится равной A_{RR} . Расчет показателя значения линейной акустической анизотропии поглощения производят по формуле [5]:

$$D = \frac{A_{RE} - A_{RR}}{A_{RE} + A_{RR}}. \quad (1)$$

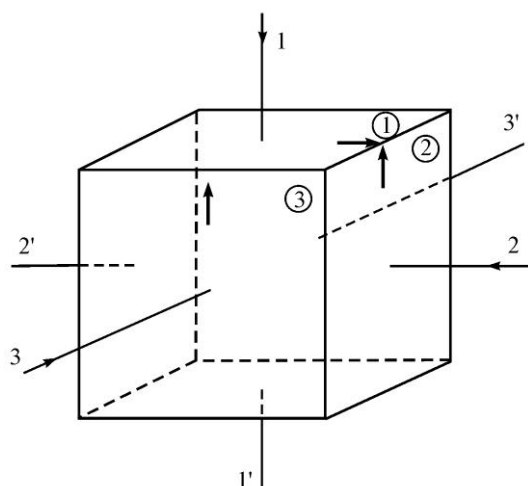


Рис. 2. Схема кубического образца и маркировка его осей

Акустополяриграммы, полученные в положении ВС, позволяют определить число и направленность проекций элементов упругой симметрии анизотропного образца [5]. Данные проекции являются направлениями, в которых скорости поперечных колебаний принимают экстремальные значения. Соответственно, последующие определения скоростей производили в этих направлениях.

Результаты измерений величин скорости распространения продольных (V_P) и поперечных (V_S) волн по всем граням кубического образца отображались в виде квазиматрицы [5]:

$$V_{ij} = \begin{matrix} & \begin{matrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{matrix} \end{matrix}, \quad (2)$$

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 ОВП 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.

По данным квазиматрицы рассчитывали средние величины скорости продольной волны для образца, $V_{PR} = (V_{11} + V_{22} + V_{33})/3$. Средние величины скорости поперечной волны определены как $V_{SR} = (V_{12} + V_{13} + V_{21} + V_{23} + V_{31} + V_{32})/6$.

Как выше было отмечено, петрофизические свойства пород, находящихся на глубинах 7–12 км, отличны от тех, которые свойственны образцам, извлеченным на земную поверхность. В извлеченных образцах за счет разницы в коэффициентах расширения у разных минералов происходит образование разгрузочных микротрещин [5, 7]. В ряде работ показано, что показатели ρ , V_P , V_S пород на больших глубинах близки к тем, которые определены по их минеральному составу [8, 9, 10, 11]. Поэтому нами выполнен расчет величин плотности и скорости распространения продольных и поперечных волн по минеральному составу породы. В качестве исходных учитывался минеральный состав породы (табл. 1) и значения параметров отдельных минералов, слагающих породу [8, 12]. Расчеты средних значений плотности (ρ_C) и скорости распространения продольных (V_{PC}) и поперечных (V_{SC}) волн выполнены по формуле [8]:

$$\ln V_k = \frac{\sum \ln V_i P_i}{\sum P_i}, \quad (3)$$

где V_k – средняя расчетная плотность (скорость) в породе; V_i – средняя плотность (скорость) в каждом минерале; P_i – парциальная доля минерала, составляющего породу.

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

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

$$G = \rho V_S^2; \quad (5)$$

$$\nu = (V_P^2/V_S^2 - 2) / (2V_P^2/V_S^2 - 2). \quad (6)$$

Обсуждение результатов

Примеры фотографий шлифов основных пород архейской части разреза представлены на рис. 3. Описание структуры пород и минерального состава приведено в табл. 1.

Отобранные образцы представлены в основном гнейсами, сланцами, амфиболитами. Гнейсы обладают среднезернистой лепидогранобластовой структурой. Основные породообразующие минералы гнейсов (в %): плагиоклаз (47–65), биотит (11–42), кварц (0,7–24), в незначительной степени представлен гранат ~12 % и кианит ~8 %. Присутствуют и акцессорные минералы – ильменит, эпидот, циркон, апатит.

Отобранные образцы сланцев в основном представлены среднезернистой, лепидогранобластовой структурой. Сланцы содержат (в %): плагиоклаз (43–50), биотит (12–42), кварц (2–18), в небольшом количестве эпидот ~12 % и мусковит ~8 %. Акцессорные минералы – роговая обманка, ильменит, апатит, хлорит, эпидот, циркон, рудные минералы. Структура пород амфиболитов в основном среднезернистая, нематогранобластовая, рассланцованная. Основными породообразующими минералами амфибо-

литов являются (в %): роговая обманка (46–83), плагиоклаз (4–32), кварц ~11 %. В качестве акцессорных минералов представлены апатит, эпидот, ильменит, биотит, хлорит, циркон, рудные минералы.

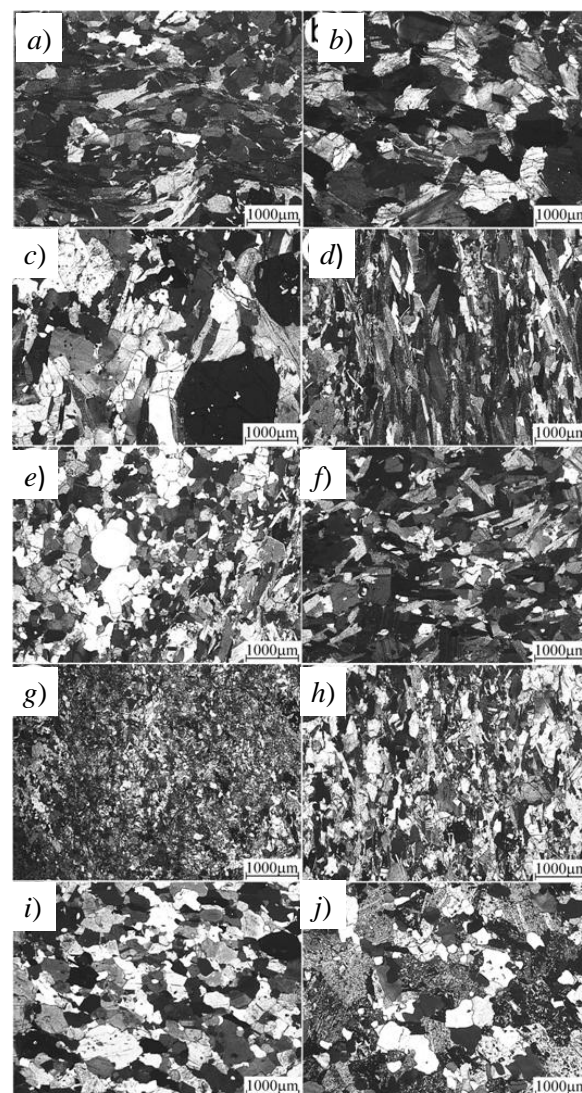


Рис. 3. Примеры фотографий шлифов основных пород архейской части разреза Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3). Гнейсы: *a* – SG-23881a; *b* – SG-41154-2; *c* – SG-42148-2. **Сланцы:** *d* – SG-23542н; *e* – SG-30025н; *f* – SG-39164. **Амфиболиты:** *g* – SG-23467; *h* – SG-28186н; *i* – SG-40903н. **Мусковит-эпидот-плагиоклазовая порода:** *j* – SG-43384-3.



Таблица 1

Минеральный состав и структура пород образцов из архейской части разреза СГ-3

| Номер образца | Глубина, м | Минеральный состав, % | Структура | Определение породы |
|------------------|-----------------|---|--|--|
| Амфиболиты | | | | |
| SG-23467 полир. | 7263.0-7275.1 | Hbl-63.5; Pl-20.1; Qtz-5.1; Ttn-0.3; Bt -1.6; Ilm-3.9; Or-3.4; Ap-0.4; Cb-1.7 | с/з, нематогранобластовая, реликты габброфитовой, линзовидные обособления Hb-Qz- Cb состава | Амфиболит полевошпатовый |
| SG-26158а, н. | ~ 7695.25 | Hbl-83.3; Pl-4.1; Bt -3.6; Ilm-4.2; Srp -4.4; Ep-0.4 | м/з, гранобластовая, реликты панидиоморфнозернистой | Амфиболит анхимономинеральный (метапироксенит) |
| SG-26977н полир. | 7994.4-8000.3 | Hbl-46.8; Bt -11.1; Pl-22.1; Qtz-0.2; Or-2.4; Ep-15.1; Ttn-2.3 | с/з, нематогранобластовая, сильное рассланцевание | Амфиболит полевошпатовый |
| SG-28186н | 8213.9-8222.0 | Act-30.0; Bt-5.2; Pl-42.8; Qtz-4.4; Or-3.0; Ep-14.3; Ttn-0.3 | с/з, нематогранобластовая, сильное рассланцевание, перекристаллизация, обособления Or-Qtz-Pl состава | Амфиболит полевошпатовый |
| SG-31093н | 8701.2-8715.7 | Hbl-61.7; Bt-0.2; Pl-32.9; Ilm-5.2 | с/з, нематогранобластовая, сильное рассланцевание, перекристаллизация, обособления, с образованием к-з агрегатов Hbl и линзовидных агрегатов зерен Ilm | Амфиболит полевошпатовый |
| SG-37263 | ~ 10253.7 | Hbl-60.6933; Pl-20.0; Qtz-11.7; Or-2.13; Ep-3.33; Chl-0.02; Ilm-2.2; Ap-0.03; Zrn-0.02 | с/з, нематогранобластовая, легкое рассланцевание | Амфиболит полевошпатовый |
| SG-40903н | 11253.7-11263.0 | Hbl-66.9; Pl-22.1; Qtz-7; Ep-0.35; Ilm-3.6; Ap-0.05 | с/з, нематогранобластовая, легкое рассланцевание | Амфиболит полевошпатовый |
| Гнейсы | | | | |
| SG-23881а полир. | 7382.1-7396.1 | Bt -13.3; Grt-6.5; Pl-54.9; Qtz-23.7; Ilm-1.5; Ep-0.05; Zrn-0.05 | с/з, лепидогранобластовая, порфиоровидная | Гранат-биотитовый гнейс |
| SG-38631н | 10502.0-10518.6 | Bt-34.6; Ms-5.5; Pl-47.3; Qtz-10.4; Ilm-2.2; ед. з-на Ap и Zrn | неравнозернистая, лепидогранобластовая, легкая перекристаллизация, обособления Qtz-Pl состава | Мусковит-биотитовый гнейс |
| SG-41154-2 | 11324.0-11336.0 | Bt -42.3; Ky-8.4; Pl-46.9; Qtz-0.7; Ilm-1.45; Ep-0.25; | с/з, лепидогранобластовая | Кианит-биотитовый гнейс глиноземистый |
| SG-42003н | ~ 11487.05 | Bt -14.0; Ky-5.3; Pl-65.4; Qtz-4.1; Ilm-5.4; Ep-4.25; Sil-1.5; Ap-0.05 | с/з, лепидогранобластовая | Кианит-биотитовый гнейс глиноземистый, с силлиманитом |
| SG-42148-2 | ~ 11487.05 | Grt-12.6; Bt -10.8; Ky-5.3; Pl-57.4; Qtz-7.1; Ilm-2.4; Sil-4.5 | с/з, лепидогранобластовая, порфиоровидная | Гранат-кианит-биотитовый гнейс глиноземистый, с силлиманитом |
| Сланцы | | | | |
| SG-23542н полир. | 7331.4-7340.8 | Bt -41.6; Ms-8.5; Pl-42.9; Qtz-2.2; Hbl-0.1; Ttn-0.2; Ilm-3.0; Ap-0.1; Chl-0.3. Ep-1.0; Zrn-0.1 | с/з, лепидогранобластовая, интенсивное рассланцевание, послойная перекристаллизация с образованием агрегатов Bt | Сланец двуслюдяной |



Продолжение табл. 1

| | | | | |
|--------------------------------|-----------------|--|---|--|
| SG-23696a | 7357.6-7366.6 | Bt -18.4; Ms-8.3; Grt-1.5; Pl-49.9; Qtz-18.0; Ilm-1.6; Ap-0.05; Ep-2.2; Zrn-0.05 | с/з, лепидогранобластовая, интенсивное рассланцевание, по- слойная перекрис-таллизация с образованием Qtz-Pl агрегатов | Сланец двуслюдяной, с гранатом |
| SG-30025н | ~ 8107.1 | Ep-12.4; Bt-23.9; Pl-47.3; Qtz-12.6; Or-3.5; Ttn-0.3 | неравномернозернистая, лепидо- гранобластовая, порфировидная, перекристаллизация, обособле- ния Or-Qtz- Pl состава | Ep-Bt сланец |
| SG-34016н. | ~ 8865.95 | Bt -11.7; Ms-1.4; Ep-4.4; Qtz-18.0; Pl-64.4; Ttn-0.1 | м/з, лепидогранобластовая, пе- рекристаллизация, обособления Qtz-Pl состава | Эпидот-биотитовый сланец, с мусковитом |
| SG-39164 | 10666.8-10679.0 | Ep-8.6; Bt-28.3; Pl-44.2; Qtz-12.2; Chl-1.2; Ilm-2.2; Ttn-3.3; ед. з-на Ap и Zrn | неравномернозернистая, лепидо- гранобластовая, легкая пере- кристаллизация, обособления Qtz-Pl состава | Эпидот-биотитовый сланец |
| Амфиболиты | | | | |
| SG-23467 полир. | 7263.0-7275.1 | Hbl-63.5; Pl-20.1; Qtz-5.1; Ttn-0.3; Bt -1.6; Ilm-3.9; Or-3.4; Ap-0.4; Cb-1.7 | с/з, нематогранобластовая, ре- ликты габброофитовой, линзо- видные обособления Hb-Qz- Cb состава | Амфиболит полевошпатовый |
| SG-26158а, н. | ~ 7695.25 | Hbl-83.3; Pl-4.1; Bt -3.6; Ilm-4.2; Srp -4.4; Ep-0.4 | м/з, гранобластовая, реликты панидиоморфнозернистой | Амфиболит анхимономинеральный (метапироксенит) |
| SG-26977н полир. | 7994.4-8000.3 | Hbl-46.8; Bt -11.1; Pl-22.1; Qtz-0.2; Or-2.4; Ep-15.1; Ttn-2.3 | с/з, нематогранобластовая, силь- ное рассланцевание | Амфиболит полевошпатовый |
| SG-28186н | 8213.9-8222.0 | Act-30.0; Bt-5.2; Pl-42.8; Qtz-4.4; Or-3.0; Ep-14.3; Ttn-0.3 | с/з, нематогранобластовая, силь- ное рассланцевание, перекри- сталлизация, обособления Or- Qtz-Pl состава | Амфиболит полевошпатовый |
| SG-31093н | 8701.2-8715.7 | Hbl-61.7; Bt-0.2; Pl-32.9; Ilm-5.2 | с/з, нематогранобластовая, силь- ное рассланцевание, перекри- сталлизация, обособления, с об- разованием к-з агрегатов Hbl и линзовидных агрегатов зерен Ilm | Амфиболит полевошпатовый |
| SG-37263 | ~ 10253.7 | Hbl-60.6933; Pl-20.0; Qtz-11.7; Or-2.13; Ep-3.33; Chl-0.02; Ilm-2.2; Ap-0.03; Zrn-0.02 | с/з, нематогранобластовая, лег- кое рассланцевание | Амфиболит полевошпатовый |
| SG-40903н | 11253.7-11263.0 | Hbl-66.9; Pl-22.1; Qtz-7; Ep-0.35; Ilm-3.6; Ap-0.05 | с/з, нематогранобластовая, лег- кое рассланцевание | Амфиболит полевошпатовый |
| Мусковит-плагиоклазовая порода | | | | |
| SG-33386н | 9016.2-9022.9 | Pl-78.3; Ms-6.4; Ep-15.1; Ttn-0.2 | с/з, аллотриоморфнозернистая | Мусковит-эпидот- плагиоклазовая порода |
| SG-37208н | 10002.6-10005.4 | Qtz-22.4; Pl-75.2; Ms-2.15; Ep-0.03; Ilm-0.2; Chl-0.02 | с/з, аллотриоморфнозернистая | Мусковит-кварц- плагиоклазовая порода |
| SG-43384-3 | 10996.5-10997.2 | Pl-60.3; Qtz-33.2; Ms-4.4; Ep-2.1 | с/з, аллотриоморфнозернистая | Кварц-плагиоклазовая порода, перекристалли- зованная, с мусковитом |

Примечание. Обозначение минералов дано по Kretz R [13].



Таблица 2

**Петрофизические свойства образцов (экспериментальные и расчетные данные)
из архейской части разреза СГ-3**

| Номер образца | Наименование породы | ρ_R , г/см ³ | ρ_C , г/см ³ | Матрица скорости V_{ij} , км/с | V_{PR} , км/с | V_{PC} , км/с | V_{SR} , км/с | V_{SC} , км/с | IAAP: D_1 , D_2 , D_3 |
|-----------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Гнейсы | | | | | | | | | |
| SG-23881a полир. | Гранат-биотитовый гнейс | 2.68 | 2.82 | 5.87 2.47 3.11 2.54 5.62 2.80 1.97 1.94 4.24 | 5.24 | 6.33 | 2.47 | 3.64 | 0.53 0.70 0.0 |
| SG-38631н. | Мусковит-биотитовый гнейс | 2.50 | 2.81 | 3.36 2.42 2.19 2.59 3.28 2.53 --' --' 3.06 | 3.23 | 6.15 | 2.43 | 3.35 | 0.29 0.01 0.20 |
| SG-41154-2 | Кианит-биотитовый гнейс глиноземистый | 2.97 | 2.92 | 3.87 2.36 2.19 --' --' --' --' --' --' | 3.87 | 6.39 | 2.28 | 3.38 | 0.28 0.45 0.58 |
| SG-42003н. | Кианит-биотитовый гнейс глиноземистый, с силлиманитом | 2.63 | 2.89 | 2.57 1.93 2.16 1.96 1.33 1.91 --' --' --' | 1.95 | 6.44 | 1.99 | 3.55 | 0.62 0.77 0.02 |
| SG-42148-2 | Гранат-кианит-биотитовый гнейс глиноземистый, с силлиманитом | 2.85 | 2.97 | 2.41 1.70 1.48 1.43 2.95 1.56 --' --' --' | 2.68 | 6.63 | 1.54 | 3.70 | 0.51 0.29 0.06 |
| Среднее | | 2.73± 0.17 | 2.88± 0.06 | | 3.39± 1.11 | 6.38± 0.16 | 2.14± 0.34 | 3.52± 0.14 | 0.35± 0.26 |
| Сланцы | | | | | | | | | |
| SG-23542н. полир. | Гнейсо-сланец двуслюдной | 2.89 | 2.85 | 1.40 1.83 1.73 1.40 2.46 2.44 4.64 --' 5.41 | 3.09 | 6.39 | 2.41 | 3.29 | 0.72 0.88 0.54 |
| SG-23696a | Гнейсо-сланец двуслюдной, с гранатом | 2.67 | 2.76 | 4.76 2.30 2.90 2.53 4.15 2.09 2.60 2.65 5.89 | 4.93 | 6.44 | 2.50 | 3.51 | 0.25 0.65 0.34 |
| SG-30025н. | Ер-Вт гнейсо-сланец | 2.53 | 2.83 | 4.72 2.33 2.02 2.06 2.65 1.76 1.68 1.67 1.91 | 3.09 | 6.63 | 1.92 | 3.50 | 0.18 0.58 0.58 |
| SG-34016н. | Эпидот-биотитовый гнейсо-сланец, с мусковитом | 2.59 | 2.73 | 5.51 3.05 2.51 2.50 4.29 2.21 1.94 2.01 4.29 | 4.70 | 6.25 | 2.37 | 3.53 | 0.43 0.66 0.69 |
| SG-39164 | Эпидот-биотитовый гнейсо-сланец | 2.78 | 2.93 | 4.81 2.57 2.31 2.00 3.14 1.98 1.48 1.36 --' | 3.98 | 6.31 | 1.95 | 3.48 | 0.40 0.75 0.75 |
| Среднее | | 2.69± 0.13 | 2.82± 0.07 | | 3.96± 0.77 | 6.40± 0.13 | 2.23± 0.24 | 3.46± 0.09 | 0.56± 0.20 |
| Амфиболиты | | | | | | | | | |
| SG-23467 полир. | Амфиболит полевошпатовый | 2.80 | 3.06 | 6.81 4.12 3.91 3.77 6.56 3.78 3.65 3.10 6.44 | 6.60 | 6.77 | 3.72 | 3.81 | 0.05 0.03 0.13 |
| SG-26158a, н. | Амфиболит анхимономинеральный (метапироксенит) | 3.08 | 3.18 | 5.80 3.76 2.68 2.50 3.26 2.24 2.05 2.39 3.97 | 4.34 | 7.04 | 2.56 | 3.89 | 0.29 0.48 0.39 |
| SG-26977 н. полир. | Амфиболит полевошпатовый | 2.96 | 3.09 | 5.77 2.58 2.61 2.79 3.75 2.36 1.84 1.68 2.34 | 3.95 | 6.85 | 2.31 | 3.77 | 0.02 0.0 0.07 |
| SG-28186 н. | Амфиболит полевошпатовый | 2.87 | 2.87 | 2.57 2.40 2.25 2.44 4.55 2.62 1.71 2.38 3.26 | 3.46 | 6.59 | 2.30 | 3.65 | 0.08 0.29 0.59 |

Продолжение табл. 2

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---|---------------|---------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------------|
| SG-31093н. | Амфиболит полевошпатовый | 2.93 | 3.07 | 5.96 2.21 2.53 2.28 4.83 2.68 2.58 2.62 6.20 | 5.66 | 6.87 | 2.48 | 3.82 | 0.55 0.16 0.0 |
| SG-37263 | Амфиболит полевошпатовый | 2.93 | 3.02 | 5.22 2.69 2.58 2.91 7.18 4.14 2.42 2.66 5.47 | 5.96 | 6.84 | 2.90 | 3.89 | 0.09 0.07 0.14 |
| SG-40903н. | Амфиболит полевошпатовый | 2.97 | 3.06 | 3.55 2.77 2.71 1.87 3.00 1.89 1.65 1.69 2.33 | 2.96 | 6.89 | 2.10 | 3.88 | 0.07 0.08 0.05 |
| Среднее | | 2.93± 0.08 | 3.05± 0.09 | | 4.70± 1.27 | 6.84± 0.13 | 2.62± 0.50 | 3.82± 0.08 | 0.17± 0.18 |
| Мусковит-плагиоклазовая порода | | | | | | | | | |
| SG-33386н. | Мусковит-эпидот- плагиоклазовая порода | 2.57 | 2.74 | 4.17 2.52 2.47 2.16 3.64 1.85 2.02 2.00 2.66 | 3.49 | 6.43 | 2.17 | 3.56 | 0.07 0.30 0.07 |
| SG-37208н. | Мусковит-кварц- плагиоклазовая порода | 2.61 | 2.65 | 3.78 2.28 2.00 2.48 4.22 2.57 2.87 2.30 4.44 | 4.14 | 6.23 | 2.42 | 3.59 | 0.11 0.11 0.04 |
| SG-43384-3 | Кварц- плагиоклазовая по-рода, перекри- сталлизо-ванная, с мусковитом | 2.74 | 2.65 | 6.11 2.87 3.55 3.54 6.18 3.62 3.36 3.38 6.04 | 6.11 | 6.21 | 3.39 | 3.67 | 0.06 0.03 0.17 |
| СРЕДНЕЕ | | 2.64± 0.07 | 2.68± 0.4 | | 4.58± 1.11 | 6.29± 0.10 | 2.66± 0.52 | 3.61± 0.04 | 0.11± 0.08 |

Петрофизические свойства образцов приведены в табл. 2. В ней представлены: экспериментально измеренная плотность (ρ_R) и рассчитанная по минеральному составу (ρ_C); матрица скорости V_{ij} , средние скорости распространения экспериментально определенных продольных (V_{PR}) и поперечных (V_{SR}), волн. В таблице также приведены рассчитанные скорости продольных (V_{PC}) и поперечных (V_{SC}) волн и показатели ЛААП D . В табл. 3 представлены динамические модули упругости и коэффициенты Пуассона пород.

Сравнение петрофизических свойств образцов основных пород из разреза архейской части СГ-3 (табл. 2) показывает, что плотность, полученная в лабораторных условиях (ρ_R), несколько меньше, чем рассчитанная по минеральному составу (ρ_C), как для гнейсов, так для сланцев и амфиболитов. Это объясняется трещинной пористостью, образовавшейся в результате разгрузки от литостатических напряжений глубинных образцов.

Предварительный анализ упругих свойств образцов можно выполнить по очертаниям акустополяриграмм (рис. 4). Заметим, что диаграммы ВС большей части образцов имеют форму четырехлепестковых фигур, что свидетельствует о наличии в них упругой анизотропии. Минимумы диаграмм ВС дают возможность определить пространственное положение элементов симметрии [5].

Акустополярограммы образцов гнейсов: SG-23881a, SG-41154-2, SG-42148-2 характеризуются четко выраженным проявлением эффекта ЛААП по всем граням с высокими показателями ЛААП. Для образца SG-23881a величины показателя $D_1 = 0.53$, $D_2 = 0.7$. Для образцов SG-41154-2 SG-42148-2 показатели D находятся в пределах 0.28–0.58. Фотографии шлифов, рис. 3, показывают, что зерна минералов этих образцов имеют вытянутую форму, что объясняет наличие эффекта ЛААП. На фотографии шлифа SG-42148-2 имеется крупное включение, что, вероятно, повлияло на изломанную форму диаграммы ВП, полученной на 3-й грани. Следует отметить, что шлиф этого образца сделан только в

одном сечении и не отражает объемную текстуру породы.

Акустополариграммы ВП образцов сланцев (SG-23542н, SG-30025н, SG-39164) показали еще более значимое влияние линейной акустической анизотропии поглощения. Это подтверждается очень высокими показателями ЛААП. Для образца SG-23542н D_1 , D_2 , D_3 соответственно равны 0.72, 0.88, 0.54. Для образца SG-39164 эти показатели равны 0.40, 0.75, 0.75. Соответственно, на фото шлифов сланцев отмечается более строгая ориентировка вытянутых в одном направлении зерен, чем в гнейсах. Следует отметить, что эффект ЛААП в большой степени отражает контраст акустических свойств на контактах, ориентированных в одном направлении соседних зерен минералов и микротрещин, развитых на этих контактах.

Акустополариграммы ВП первых двух граней (1-1', 2-2') образца амфиболита SG-23467 указывают на наличие умеренной анизотропии, практически без влияния ЛААП, рис. 4. Это же отражено в показателях D . На всех трех гранях наблюдаются минимумы диаграмм ВС. Из обзора фотографии шлифа следует, что прослеживается директивная направленность форм зерен минералов. Анализ акустополариграмм образца амфиболита SG-28186н указывает на наличие эффекта ЛААП практически на всех гранях. Для образца SG-28186н величины показателя $D_1 = 0.08$, $D_2 = 0.29$, $D_3 = 0.59$ довольно значительны. На фото шлифов образца SG-28186н хорошо прослеживается направленность зерен минералов.

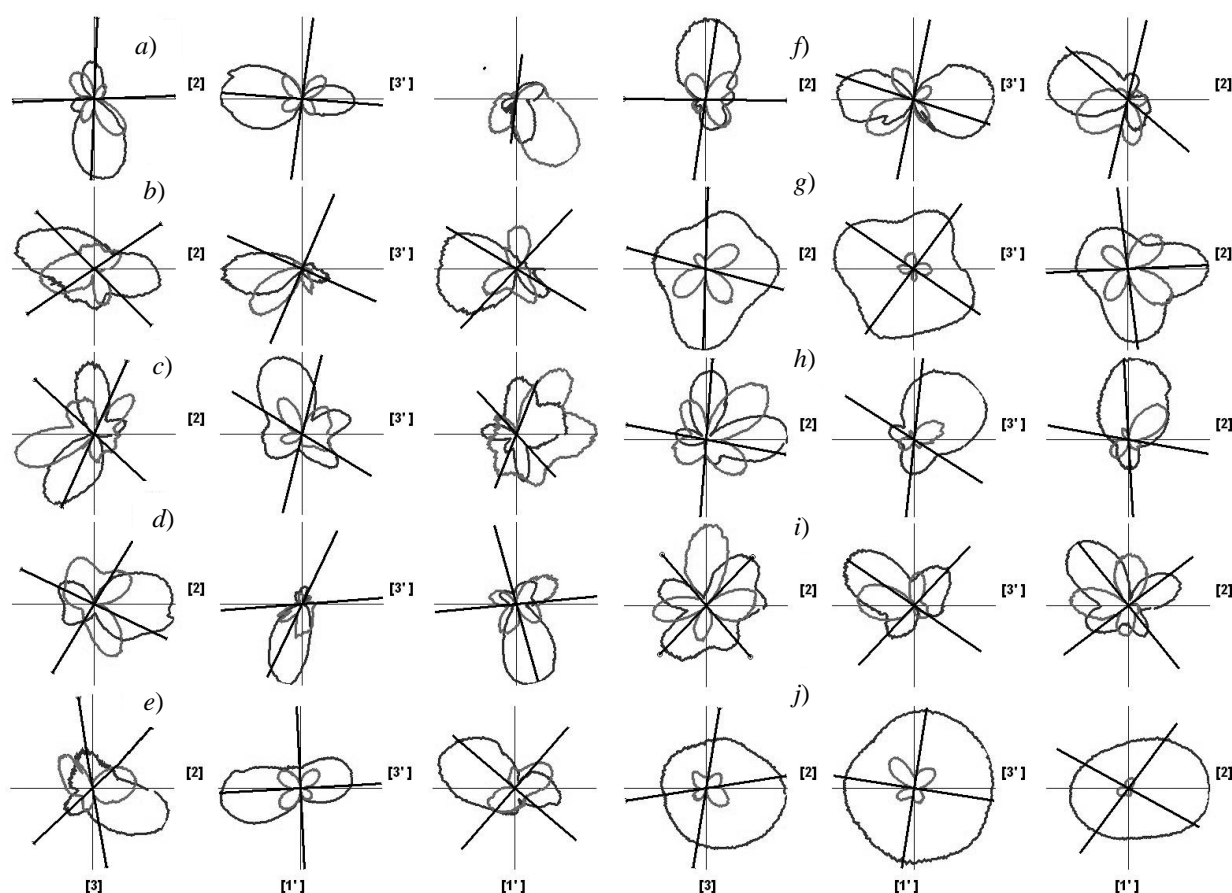


Рис. 4. Примеры акустополариграмм основных пород архейской части разреза Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3). Гнейсы: *a* – SG-23881а; *b* – SG-41154-2; *c* – SG-42148-2. Сланцы: *d* – SG-23542н; *e* – SG-30025н; *f* – SG-39164. Амфиболиты: *g* – SG-23467; *h* – SG-28186н; *i* – SG-40903н. Мусковит-эпидот-плагиоклазовая порода: *j* – SG-43384-3.



Диаграммы ВП на всех трех гранях образца SG-43384-3 (кварц-плагиоклазовая порода) близки к круговым, без влияния эффекта ЛААП ($D_1 = 0.06$, $D_2 = 0.03$, $D_3 = 0.17$). Диаграммы ВС первой и второй граней образца демонстрируют малое наличие анизотропии. Таким образом, данный образец можно отнести к упруго изотропным. Это объясняется низким содержанием сугубо анизотропного минерала мусковита (4.4 %, см. табл. 1) и высоким содержанием кварца, упругая анизотропия которого мала [8]. Кроме этого, на фотографии шлифа породы (см. рис. 3) видимой ориентировки зерен не наблюдается.

Сравнение средних показателей ЛААП для породы в целом показывает, что этот показатель численно отражает направленность структуры породы. Например, для сланцев, ориентированная структура которых в шлифах наиболее выражена, $D_{сл} = 0.56 \pm 0.20$. Для гнейсов она составляет $D_{гн} = 0.35 \pm 0.26$. В амфиболитах, в которых содержится наименьшее количество слюд, $D_{гн} = 0.17 \pm 0.18$.

При экспериментальных определениях скоростей, замеренных в образцах в лабораторных условиях, полная квазиматрица V_{ij} получена не для всех образцов. Из-за сильного затухания ультразвуковых волн в некоторых образцах величины скорости получены в двух или одном направлении. Неполные матрицы скорости получены на образцах SG-23542н, SG-38631н, SG-39164, SG-41154-2, SG-42003н и SG-42148-2. Причем измеренные скорости имеют необычно низкую величину, не характерную для крепких скальных пород [14, 15]. Вариации изменения средних значений скорости распространения для продольных колебаний гнейсов расходятся в широком диапазоне ($V_{PR} = 1.95\text{--}5.24$ км/с). Такой же разброс наблюдается для скорости распространения поперечных волн, $V_{SR} = 1.54\text{--}2.47$ км/с. Среднее значение экспериментально замеренных продольных скоростей гнейсов составило 3.39 ± 1.11 км/с, поперечных – 2.14 ± 0.34 км/с. Широкие пределы разброса эксперименталь-

ных скоростей наблюдаются у сланцев и у амфиболитов. Такие низкие значения средних продольных и поперечных скоростей и их большой разброс не являются реальными для гнейсов, сланцев, амфиболитов и других пород, слагающих разрез СГ-3.

Значения скоростных характеристик, близкие к условиям глубинного залегания породы, получены расчетом с учетом их минерального состава по формуле (3), табл. 2. По данным расчетов, средние значения характеристик продольных и поперечных волн, рассчитанных по минеральному составу, у гнейсов изменяются в пределах $V_{PC} = 6.15\text{--}6.63$ км/с и $V_{SC} = 3.36\text{--}3.70$ км/с соответственно. Средняя величина продольной скорости составила 6.38 ± 0.16 км/с, поперечной – 3.52 ± 0.14 км/с. Для сланцев вариации скоростных характеристик составляют $V_{PC} = 6.25\text{--}6.63$ км/с и $V_{SC} = 3.29\text{--}3.53$ км/с. Средняя продольная скорость составила 6.40 ± 0.13 км/с, поперечная – 3.46 ± 0.09 км/с. Интервал изменения средних значений характеристик продольных и поперечных волн для амфиболитов составил $V_{PC} = 6.59\text{--}7.04$ км/с и $V_{SC} = 3.65\text{--}3.89$ км/с. Их среднее – 6.84 ± 0.13 км/с и 3.82 ± 0.08 км/с соответственно. Согласно полученным средним наибольшее скорости отмечаются у амфиболитов, промежуточные – у гнейсов, меньшие – у сланцев. Поскольку расчет величин скорости производился по минеральному составу породы, эти средние отражают влияние более высокоскоростного амфибола у амфиболитов и низкоскоростных слюд у сланцев. Эти данные соответствуют величинам скорости, определенным по разрезу Кольской сверхглубокой скважины геофизическими методами, в том числе и методом вертикального сейсмического профилирования [2, 15, 16, 17].

Средние значения модулей упругости E и сдвига G , коэффициентов Пуассона ν для глубинных условий приведены в табл. 3. Значения технических постоянных, рассчитанных по минеральному составу, модуля Юнга E , модуля сдвига G и коэффициент Пуассона ν составляют: для

гнейсов $(9.18 \pm 0.74)10^4$ МПа,
 $(3.60 \pm 0.32)10^4$ МПа, 0.290 ± 0.020 ; для
 сланцев $(8.65 \pm 0.37)10^4$ МПа,
 $(3.39 \pm 0.16)10^4$ МПа, $\nu = 0.280 \pm 0.020$; для
 амфиболитов $(11.33 \pm 0.72)10^4$ МПа,
 $(4.45 \pm 0.29)10^4$ МПа, $\nu = 0.280 \pm 0.017$. Со-
 отношения величин модулей у разных

пород проявляют те же тенденции, что и
 средние скорости. Их величины меньше у
 сланцев, средние у гнейсов, *больше* у
 амфиболитов. Эти параметры могут быть
 использованы при оценке напряженного
 состояния массивов на больших глуби-
 нах.

Таблица 3
Модули упругости и коэффициенты Пуассона образцов из архейской части разреза СГ-3

| Номер образца | Наименование породы | Глубинные условия | | |
|--------------------------------|---|-------------------------|-------------------------|-------------|
| | | $E \cdot 10^{-4}$, МПа | $G \cdot 10^{-4}$, МПа | ν |
| Гнейсы | | | | |
| SG-23881 а полир. | Гранат-биотитовый гнейс | 9.35 | 3.73 | 0.252 |
| SG-38631 н. | Мусковит-биотитовый гнейс | 8.14 | 3.16 | 0.288 |
| SG-41154-2 | Кианит-биотитовый гнейс глиноземистый | 8.73 | 3.34 | 0.306 |
| SG-42003 н. | Кианит-биотитовый гнейс глиноземи- стый, с силлиманитом | 9.34 | 3.64 | 0.282 |
| SG-42148-2 | Гранат-кианит-биотитовый гнейс глино- земистый, с силлиманитом | 10.36 | 4.07 | 0.273 |
| Среднее | | 9.18±0.74 | 3.6±0.32 | 0.290±0.020 |
| Сланцы | | | | |
| SG-23542 н. полир. | Гнейсо-сланец двуслюдяной | 8.02 | 3.09 | 0.300 |
| SG-23696 а | Гнейсо-сланец двуслюдяной, с гранатом | 8.60 | 3.40 | 0.265 |
| SG-30025 н. | Ер-Вт гнейсо-сланец | 8.85 | 3.46 | 0.278 |
| SG-34016 н. | Эпидот-биотитовый гнейсо-сланец, с мусковитом | 8.62 | 3.41 | 0.265 |
| SG-39164 | Эпидот-биотитовый гнейсо-сланец | 9.11 | 3.56 | 0.281 |
| Среднее | | 8.65±0.37 | 3.39±0.16 | 0.280±0.020 |
| Амфиболиты | | | | |
| SG-23467 полир. | Амфиболит полевошпатовый | 11.27 | 4.44 | 0.268 |
| SG-26158 а, н. | Амфиболит анхимономинеральный (ме- тапироксенит) | 12.32 | 4.81 | 0.280 |
| SG-26977 н. полир. | Амфиболит полевошпатовый | 11.24 | 4.38 | 0.284 |
| SG-28186 н. | Амфиболит полевошпатовый | 9.78 | 3.82 | 0.279 |
| SG-31093 н. | Амфиболит полевошпатовый | 11.41 | 4.47 | 0.277 |
| SG-37263 | Амфиболит полевошпатовый | 11.53 | 4.57 | 0.261 |
| SG-40903 н. | Амфиболит полевошпатовый | 11.72 | 4.62 | 0.267 |
| Среднее | | 11.33±0.72 | 4.45±0.29 | 0.280±0.017 |
| Мусковит-плагиоклазовая порода | | | | |
| SG-33386 н. | Мусковит-эпидот-плагиоклазовая порода | 8.86 | 3.46 | 0.279 |
| SG-37208 н. | Мусковит-кварц-плагиоклазовая порода | 8.55 | 3.42 | 0.252 |
| SG-43384-3 | Кварц-плагиоклазовая порода, перекри- сталлизованная, с мусковитом | 8.80 | 3.57 | 0.232 |
| Среднее | | 8.73±1.34 | 3.48±0.63 | 0.254±0.019 |

Заключение

Изучены петрофизические свойства гнейсов, сланцев, амфиболитов, которые представляют основные породы архейской части разреза Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3). Их главными породообразующими минералами являются

плагиоклаз, роговая обманка, слюды, кварц. Текстура пород в основном среднезернистая, структура – нематогранобластовая, лепидогранобластовая. Обзор акустополяриграмм показал, что большинство образцов относится к упруго анизотропным средам. Эффект линей-



ной акустической анизотропии (ЛААП) проявляется в той или иной мере в большинстве образцов. Сравнение показателя ЛААП для разных пород выявило, что эта характеристика может численно отражать направленность структуры породы.

Плотность образцов из разреза архейской части СГ-3, полученная в лабораторных условиях, несколько меньше, чем рассчитанная по минеральному составу, причем она меньше у сланцев и больше у амфиболитов. На величины скорости распространения продольных и поперечных волн в образцах, извлеченных с глубин 7–12 км, значительное влияние оказывает эффект разуплотнения. Измеренные на образцах скорости имеют необычно низкую величину, не характерную для крепких скальных пород, которые залегают на глубине извлечения. Поэтому более реальными являются скоростные характеристики пород, рассчитанные по их минеральному составу. По данным расчетов, наибольшие скорости отмечаются у амфиболитов, почти равные у гнейсов и сланцев. Средние значения скорости продольных и поперечных волн у гнейсов, рассчитанных по минеральному составу, составили 6.38 ± 0.16 км/с, поперечных – 3.52 ± 0.14 км/с. Для сланцев средняя продольная скорость равна 6.40 ± 0.13 км/с, поперечная – 3.46 ± 0.09 км/с. Средние значения скорости продольных и поперечных волн для амфиболитов равны: 6.84 ± 0.13 км/с и 3.82 ± 0.08 км/с соответственно.

Соотношение величин модулей сжатия и сдвига у разных пород проявляют те же тенденции, что и средние скорости. Однако их величины меньше у сланцев, средние у гнейсов, большие у амфиболитов.

Таким образом, экспериментальные данные, полученные на образцах, извлеченных из глубины в несколько км, непосредственно не могут быть использованы для оценки скоростных характеристик пород. Близкие значения продольных и поперечных скоростей в породах на глубине можно получить расчетным методом, используя данные по минеральному

составу. Большой объем информации о свойствах пород можно получить, применяя акустополяризационный метод исследований.

Авторы выражают благодарность доктору г.-м.н. П.К. Скуфьину за проведенный минеральный анализ шлифов и Российскому фонду фундаментальных исследований (грант № 16-05-00026-а), при поддержке которого получена большая часть приведенных в статье результатов.

Библиографический список

1. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины. М.: Недра. 1984. 490 с.
2. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. М.: МФ «Технонефтегаз», 1998. 260 с.
3. Горбацевич Ф.Ф., Медведев Р.В. Механизм разуплотнения кристаллических горных пород при их разгрузке от напряжений. В кн.: Рудные геофизические исследования на Кольском полуострове. Апатиты. Изд. Кольского филиала АН СССР. 1986. С. 83–89.
4. Горбацевич Ф.Ф. Акустополярископ для измерения упругости образцов твердых сред. А. с. СССР № 1281993. Бюлл. изобр. № 1, 1987.
5. Горбацевич Ф.Ф. Акустополярископия горных пород. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1995. 203 с.
6. Ковалевский М.В. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustopol: Учеб. пособие. Апатиты: Изд-во ООО «К & М», 2009. 54 с.
7. Gorbatsevich F.F. Decompaction mechanism of deep crystalline rocks under stress relief. Tectonophysics. V. 370. Issues 1–4, 2003. P. 121–128.
8. Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М.: Наука, 1970. 276 с.
9. Cristensen N.I., Mooney W.D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view // J. Geophys. Res. 1995. V. 100 (B7). P. 9761–9788.
10. Rudnick, R.L. and Fountain, D.M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. Rev. Geophysics. 1995. V. 33. P. 267–309.
11. Головатая О.С., Горбацевич Ф.Ф., Керн Х., Попп Т. Свойства некоторых пород из



разреза Кольской сверхглубокой скважины при изменении РТ-параметров // Физика Земли, 2006. № 11. С. 3-14.

12. 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, 151-166.

13. Kretz R. Symbols for rock-forming minerals // Amer. Mineral. 1983. V. 68. P. 277-279.

14. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Ред. М.М. Протоцких М.: Недра, 1975. – 279 с.

15. 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.

16. Digranes P., Kristoffersen Y., Karajev N. An analysis of shear waves observed in VSP data from the superdeep well at Kola, Russia // Geophys. J. Int. 1996. V. 126. P. 545-554.

17. Структура, свойства, состояние пород и геодинамика в геопространстве Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) / Под ред. Горбачевича Ф.Ф. / СПб: Наука. 2015. 366 с.

18. Kretz R. Symbols for rock-forming minerals. Amer. Mineral., 1983, vol. 68, pp. 277-279.

“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2017, No. 2, pp. 28-40

| | |
|------------------|--|
| Title: | Some petrophysical properties of the main rocks from the Archaean section of the Kola superdeep borehole SG-3 |
| Author 1 | <i>Name&Surname:</i> Felix F. Gorbatsевич <i>Company:</i> Geological Institute, Geological Institute of the Kola Science Center Russian Academy of Sciences, <i>Address:</i> 14 Fersman St., Apatity 184209, Murmansk region, Russia <i>Contacts:</i> gorich@geoksc.apatity.ru |
| Author 2 | <i>Name&Surname:</i> Olga M. Trishina <i>Company:</i> Geological Institute, Geological Institute of the Kola Science Center Russian Academy of Sciences, <i>Address:</i> 14 Fersman St., Apatity 184209, Murmansk region, Russia <i>Contacts:</i> trishina@geoksc.apatity.ru |
| Author 3 | <i>Name&Surname:</i> Kovalevskiy M.V. <i>Company:</i> Geological Institute, Geological Institute of the Kola Science Center Russian Academy of Sciences, <i>Address:</i> 14 Fersman St., Apatity 184209, Murmansk region, Russia <i>Contacts:</i> koval@geoksc.apatity.ru |
| DOI | DOI: 10.17073/2500-0632-2017-2-28-40 |
| Abstract: | The values of density and velocity in the samples of the main rocks from the Archaean section of the Kola superdeep borehole (SG-3) drilled in the northern frame of the Pechenga palaeorift structure were studied. The predominant part of rocks of the SG-3 Archaean section is represented by gneisses, schists and amphibolites. Their main rock forming minerals are plagioclase, hornblende, mica and quartz. The structure of the rocks is mainly medium-grained, the texture is nematogranoblastic and lepidogranoblastic. The elastic anisotropy and orientation of the rock texture were estimated by the acoustopolariscopy method, the density and velocity of compression and shear waves were determined in the laboratory and the mentioned characteristics were calculated by the mineral composition. The measured sample velocities are unusually low, which can be explained by the decompaction effect of deep rocks. The values of the velocity characteristics that are close to those for the conditions of the rock deep occurrence are obtained by calculation with regard to their specific mineral composition. The average values of the velocity of compression and shear waves for gneisses calculated by the mineral composition are 6.38 ± 0.16 km/s and $3.52 \pm$ |



| | |
|--------------------|---|
| | 0.14 km/s, respectively. The average of the compression wave velocity for schists is 6.40 ± 0.13 km/s, of the shear wave velocity – 3.46 ± 0.09 km/s, and for amphibolites 6.84 ± 0.13 km/s and 3.82 ± 0.08 km/s, respectively. The ratios of the values of compression and shear moduli in different rocks exhibit the same trends as the average velocities. However, their values are lower in schists, medium in gneisses and grater in amphibolites. |
| Keywords: | Kola superdeep borehole (SG-3), deep rocks, properties, densities, compression and shear wave velocities |
| References: | <ol style="list-style-type: none"> 1. Kol'skaya sverhglubokaya [Kola superdeep] Red. Ye.A. Kozlovsky. Moscow, Nedra, 1984, 490 p. 2. Kol'skaya sverhglubokaya. Nauchnye resul'taty i opyt issledovaniya [Kola Superdeep. Scientific results and research experience]. Moscow, MF "Tehnoneftegaz", 1998, 260 p. 3. Gorbatshevich F.F., Medvedev R.V. Mekhanizm razuplotneniya kristalliticheskikh gornyh porod pri ih razgruzke ot napryazheniy [Decompaction mechanism of crystalline rocks under stress release]. разуплотнения кристаллических горных пород при их разгрузке от напряжений. V kn.; Rudnye geofizicheskie issledovaniya na Kol'skom poluostrove [Ore geophysical investigations on the Kola Peninsula] Apatity, Izd. Kol'skogo filiala AN SSSR, 1986, pp. 83-89. 4. Gorbatshevich F.F. Akustopolariskop dlya izmereniya uprugosti obraztsov tverdyh sred [Acoustopolariscope for determining of solid media elasticity] Avt. svid. SSSR, no. 1281993, 1987. 5. Gorbatshevich F.F. Akustopolariskopiya gornyh porod [Acoustopolariscopy of rock samples]. Apatity, Izd. KNC RAN, 1995, 203 p. 6. Kovalevskiy M.V. Avtomatizirovannyi programmno-apparatnyi kompleks Acoustpol [The automated software and hardware complex Acoustpol]: Uchebnoe posobie: Apatity, Izd. "K&M", 2009. 54 p. 7. Gorbatshevich F.F. Decompaction mechanism of deep crystalline rocks under stress relief. Tectonophysics, 2003, vol. 370, no. 1-4., pp. 121-128. 8. Belikov B.P., Aleksandrov K.S., Ryzhova T.V. Uprugie svoystva porodoobrazuyuschih mineralov i gornyh porod [Elastic properties of rock-forming minerals and rocks]. Moscow, Nauka, 1970, 276 p. 9. Cristensen N.I., Mooney W.D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view. J. Geophys. Res., 1995, vol. 100 (B7), pp. 9761-9788. 10. Rudnick, R.L. and Fountain, D.M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. Rev. Geophysics, 1995, vol. 33, pp. 267-309. 11. Golovataya O.S., Gorbatshevich F.F., Kern X., Popp T. Svoystva nekotorykh porod iz pazreza Kol'skoy sverhglubokoy skvaziny pri izmenenii PT-parametrov [Properties of some rocks from the section of the Kola ultradeep borehole as a function of the P-T parameters]. Fizika Zemli = Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2006, no. 11, pp. 3-14. 12. 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, vol. 175, pp. 151-166. 13. Kretz R. Symbols for rock-forming minerals. Amer. Mineral., 1983, vol. 68, pp. 277-279. 14. Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornyh porod [Reference book (cadastre) of the rock physical properties]. Red. M.M. Protodiakonov. Moscow, Nedra, 1975, 279 p. 15. Stroenie litosfery possiyskoy chasti Barentc regiona [The lithosphere structure of the Russian part of the Barents Region]. Red. N.V. Sharov, F.P. |



Mitrofanov, M.L. Verba, K. Gillen. Petrozavodsk. Karel'sky nauchnyi tcentr PAN, 2005. 318 p.

16. Digranes P., Kristoffersen Y., Karajev N. *An analysis of shear waves observed in VSP data from the superdeep well at Kola, Russia*. Geophys. J. Int., 1996, vol. 126, pp. 545-554.

17. Structura, svoistva, sostoyanie porod i geodinamika v geoprostranstve Kol'skoy sverhglubokoy skvazhiny (SG-3) [*Structure, properties, state of rocks and geodynamics in the geospace of the Kola superdeep borehole (SG-3)*]. Red. F.F. Gorbatsevich. Sankt Peterburg, Nauka, 2015, 366 p.

18. Kretz R. *Symbols for rock-forming minerals*. Amer. Mineral., 1983, vol. 68, pp. 277-279.