

# ГЕОЭКОЛОГИЯ

# ГЕОЭКОЛОГИЯ

## ГРУНТОВЕДЕНИЕ

УДК 534.6.550.311

# УПРУГО-АНИЗОТРОПНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД ПО РАЗРЕЗУ ФИНСКОЙ СКВАЖИНЫ (ОКУ) В ДИАПАЗОНЕ ГЛУБИН ДО 1 КМ

© 2009 г. М. В. Ковалевский, Ф. Ф. Горбачевич, О. М. Тришина

Геологический институт Кольского Научного Центра РАН

Поступила в редакцию 03.09.2007 г.

Исследовательская скважина ОКУ, заложенная в юго-восточной части Балтийского щита около отработанного полиметаллического месторождения Оутокумпу (Финляндия, г. Оутокумпу), достигла предельной глубины 2516 м. Изучение свойств образцов пород скважины, отобранных в интервале до глубины 1 км, показало, что все они упруго-анизотропны и относятся к поперечно-изотропному и орторомбическому типам симметрии. Средние величины скорости распространения продольных и поперечных колебаний и плотность пород существенно не изменяются с глубиной.

## ВВЕДЕНИЕ

Сейсмический разрез массива скважины ОКУ представлен на рис. 1. В интервале скважины в основном вскрыты мафические породы и породы, представленные слюдястыми и черными сланцами [16]. В диапазоне глубин до 20 м находятся четвертичные осадки (ил, песок, гравий); от 20 до 400 м – породы протерозойского возраста, преимущественно слюдястые сланцы; от 400 до 1000 м залегают слюдястые сланцы с прослоями черных сланцев. На глубине 1.2–1.3 км расположена граница, разделяющая породы протерозойского возраста и архейского фундамента.

Реальный разрез показал, что верхняя часть скважины, примерно до глубины 1310 м прошла через слюдястые сланцы с редкими прослоями биотитовых гнейсов. Интервал 1310–1515 м сло-

жен перемежающимися слоями черных сланцев, биотитовых гнейсов, серпентинитов, диопсид-тремолитовых скарнов. В интервале 1500–2000 м отмечен сейсмический отражающий горизонт. Ниже 1515 м залегают слюдястые сланцы с редкими слоями черных сланцев и жилами кварца. Начиная с глубины 1655 м слюдястые сланцы перемежаются в основном слоями пегматитовых гранитов и биотитовых гнейсов. Тела пегматитовых гранитов, гранат-биотитовых гнейсов, биотит-силлиманитовых сланцев слагают нижнюю часть вскрытого разреза до предельной глубины 2516 м.

Цель исследования – определение упругих и неупругих характеристик образцов пород скважины ОКУ, отобранных в пределах глубины до 1.0 км. В работе приведены результаты исследо-

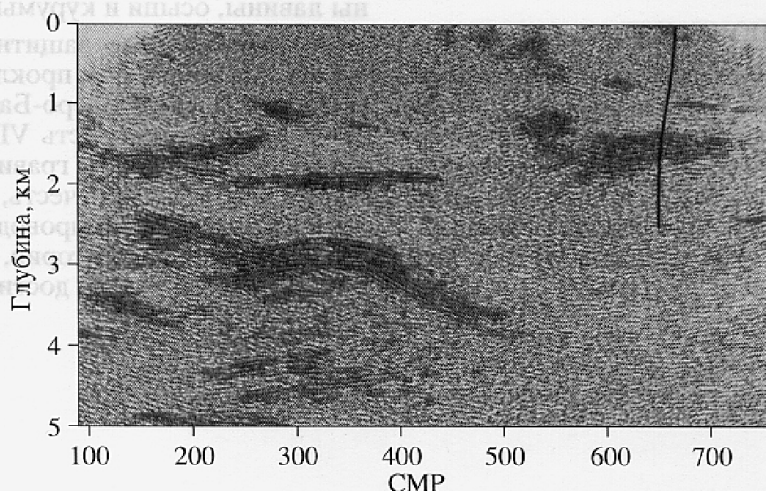


Рис. 1. Сейсмический разрез через скважину Оутокумпу (ОКУ) [13].

ваний упруго-анизотропных свойств 14 образцов керна пород. Определения показали, что восемь измеренных образцов относятся к орторомбическому типу упругой симметрии, остальные – к поперечно-изотропному. Все известные эффекты, возникающие при распространении упругих колебаний в анизотропных средах, в разной степени присутствуют и в исследованных породах. Определения выполнены на основе последних усовершенствований акустополаризационного метода на приборах для определения упругих свойств [2, 3, 6–8]. Выполненные исследования являются продолжением цикла изучения свойств и состояния пород глубоких и сверхглубоких скважин (Кольская СГ-3, Уральская СГ-4, немецкая КТВ) [5, 9, 10] с использованием акустополаризационного метода.

### МЕТОДИКА

Из керна скважины, отобранного с разных глубин, были изготовлены образцы кубической формы рис. 2. Нормали к трем взаимно перпендикулярным граням обозначены как направления 1–1', 2–2' и 3–3'. Причем направление 3–3' выбрали совпадающим с осью скважины, а направления 1–1' и 2–2' произвольно. Петрографическая характеристика пород представлена в табл. 1.

На первом этапе петрофизических определений методом Архимеда измерили объемную плотность  $\rho$  образцов (табл. 2). Для диагностики наличия анизотропии, определения числа и направленности элементов упругой симметрии нами применен акустополаризационный метод [2]. Принципиальная схема наблюдений, осуществляемых по этому методу, не отличается от схемы, применяемой при поляризационных измерениях в оптике [1], и выполняется при помощи акустополарископа [2]. Ранее нами было проведено усовершенствование существующей конструкции акустополарископа [8]. Отличительная особенность новой конструкции прибора – наличие автоматизированного привода поворотной платформы и передача данных измерений непосредственно в ПЭВМ в реальном режиме времени [6, 7]. Полный цикл определений включает построение акустополариграмм, полученных при параллельных (ВП) и скрещенных векторах поляризации (ВС), измерение величин скорости распространения упругих продольных и поперечных колебаний, вычисление коэффициентов и показателей анизотропии, определение типа упругой симметрии породы. Кроме того, определяли степень проявления неупругих эффектов, таких как эффект линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП) и др. Измерения осуществлялись на частоте ультразвукового диапазона 1.25 МГц. Наиболее подробно методика проведения определений описана в работе [2].

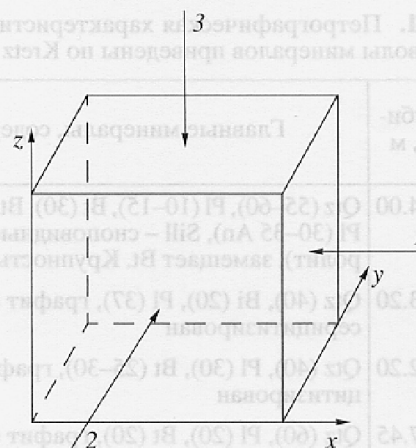


Рис. 2. Форма образца и его индексация для акустополаризационных измерений.

Результаты измерений на образцах величин скорости распространения продольных ( $V_p$ ), поперечных ( $V_s$ ) по всем граням кубических образцов представлены в виде квазиматрицы (табл. 2, [3]):

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

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

Степень эффекта ЛААП определяли по акустополариграмме, полученной при параллельных векторах поляризации (ВП), используя формулу [3]

$$D = \frac{A_{\text{нл}} - A_{\text{нс}}}{A_{\text{нл}} + A_{\text{нс}}}, \quad (2)$$

где  $A_{\text{нл}}$ ,  $A_{\text{нс}}$  – амплитуды наибольшего и наименьшего пропускания колебаний (наибольший и наименьший диаметры акустополариграммы ВП). Вычисленные значения ЛААП ( $D$ ) в образцах представлены в табл. 2.

Для оценки степени анизотропии образца в целом по продольным колебаниям применили фор-

**Таблица 1.** Петрографическая характеристика пород из керна скважины Оутокумпу (составлена В.Р. Ветриным, символы минералов приведены по Kretz [15])

| № обр. | Глубина, м | Главные минералы, содержание, %                                                                                                                     | Аксессуары и вторичные минералы  | Структуры                               | Порода                                  |
|--------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1      | 94.00      | Qtz (55–60), Pl (10–15), Bt (30), Bt – красно-бурый, Pl (30–35 An), Sill – сноповидные агрегаты (фибrolит), замещает Bt. Крупность зерен 0.2–0.5 мм | Sill (<1), Ap, Zr, графит, рудн. | Лепидобластовая, бластопсаммитовая      | Sill-Bi сланец                          |
| 2      | 153.20     | Qtz (40), Bi (20), Pl (37), графит (3), Grt (1–3), Pl серицитизирован                                                                               | Ap, Zr, Chl (по Bt)              | »                                       | Crt-Bi сланец с графитом                |
| 3      | 202.20     | Qtz (40), Pl (30), Bt (25–30), графит (3–5), Pl серицитизирован                                                                                     | Ap, Zr, рудный                   | »                                       | Bt-сланец с графитом                    |
| 4      | 247.45     | Qtz (60), Pl (20), Bt (20), графит (1–3)                                                                                                            | Ap, Zr, рудный                   | »                                       | »                                       |
| 5      | 319.25     | Qtz (30), Pl (45), Bt (15–20), Grt (3–5), графит (1–3)                                                                                              | Ap, Zr, рудн., Chl (по Bt)       | Лепидобластовая, порфиروبластовая (Crt) | Crt-Bi сланец с графитом                |
| 6      | 351.90     | Qtz (30), Pl (30), Bt (20), Grt (5), Chl (10), графит (1–3)                                                                                         | Ap, Zr, рудный                   | Лепидобластовая, бластопсаммитовая      | Crt-Bt-Chl сланец с графитом            |
| 7      | 391.70     | Qtz (35), Pl (35–37), Bt (30), графит (3–5)                                                                                                         | Ap, Zr, Chl                      | »                                       | Bt-сланец с графитом                    |
| 8      | 450.55     | Qtz (10), Pl (30), Bt (60), Ms (1–3), графит (1–3). В зернах Pl – простые двойники, Bt – красно-бурый, крупность зерен 2–5 мм                       | Ap, Zr                           | Бластогранитная                         | Биотит-силлиманитовый сланец с графитом |
| 9      | 506.10     | Qtz (30), Pl (40), Bt (30), графит (1–2), Pl серицитизирован, Bt – красно-бурый                                                                     | Ap, Zr, Chl                      | Лепидобластовая, бластопсаммитовая      | Bt-сланец с графитом                    |
| 10     | 599.00     | Qtz (50), Pl (30), Bt (10–17), Grt (3), графит (1–2)                                                                                                | Ap, Zr, Chl (по Gr), Ms          | »                                       | Crt-Bi сланец с графитом                |
| 11     | 703.25     | Qtz (30), Pl (35), Bt (30), Grt (1–3), графит (3–5)                                                                                                 | Ap, Zr                           | »                                       | Crt-Bi сланец с графитом                |
| 12     | 801.40     | Qtz (50), Pl (30), Bt (20), Grt (1–3), графит (<1)                                                                                                  | Allanite, Zr, Ap                 | »                                       | »                                       |
| 13     | 900.25     | Qtz (30), Pl (25), Bt (40), Grt (1–3), графит (1)                                                                                                   | Ap, Zr, Chl (по Bi)              | »                                       | »                                       |
| 14     | 1000.50    | Qtz (30), Pl (30), Bt (40), графит (1), Pl сильно серицитизирован, Bt – красно-бурый                                                                | Ap, Chl (по Bt)                  | »                                       | Bt-сланец с графитом                    |

мулу [3] для расчета обобщенного коэффициента анизотропии:

$$A_p = \frac{1}{V_{cp}} \sqrt{(V_{11} - V_{cp})^2 + (V_{22} - V_{cp})^2 + (V_{33} - V_{cp})^2}, \quad (3)$$

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 поперечным колебаниям рассчитывали обобщен-

ный показатель анизотропии  $B_s$ . Величину  $B_s$  вычисляли по формулам [3]:

$$B_s = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2}, \quad (4)$$

где  $B_1 = \frac{2(V_{12} - V_{13})}{(V_{12} + V_{13})}$ ;  $B_2 = \frac{2(V_{21} - V_{23})}{V_{21} + V_{23}}$ ;  $B_3 = \frac{2(V_{31} - V_{32})}{(V_{31} + V_{32})}$  – коэффициенты двулучепреломления поперечных волн, определенных соответственно для направлений 1–1', 2–2', 3–3'.

Таблица 2. Петрофизические характеристики образцов пород из скважины Оутокумпу

| Номер образца | Глубина отбора $H$ , м | Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Показатель $D$ | Матрица $V_{ij}$ , км/с | $V_{pc}$ , км/с | $V_{sc}$ , км/с | Соотношения в матрице $V_{ij}$                                    | $A_p$ , % | $B_s$ , % | Тип симметрии |
|---------------|------------------------|--------------------------------------|----------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|---------------|
| OKU-94_00     | 94.00                  | 2.80                                 | 0.22           | 5.06 3.25 2.51          | 4.38            | 2.78            | $V_{11} > V_{22} > V_{33}$                                        | 28.7      | 36.4      | Р             |
|               |                        |                                      | 0.64           | 3.19 4.70 2.46          |                 |                 | $V_{12} > V_{21} > V_{32} > V_{31} > V_{13} > V_{23}$             |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.65           | 2.59 2.66 3.38          |                 |                 | $(V_{12} > V_{21}) > (V_{32} > V_{23}) > (V_{31} > V_{13})$       |           |           |               |
| OKU-153_20    | 153.20                 | 2.62                                 | 0.19           | 5.46 3.62 2.96          | 5.36            | 3.17            | $V_{22} > V_{11} > V_{33}$                                        | 18.5      | 28.1      | Г             |
|               |                        |                                      | 0.10           | 3.61 6.00 2.97          |                 |                 | $V_{12} = V_{21} > V_{23} = V_{13} = V_{32} > V_{31}$             |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.15           | 2.88 2.96 4.61          |                 |                 | $(V_{12} = V_{21}) > (V_{23} = V_{32}) = (V_{13} > V_{31})$       |           |           |               |
| OKU-202_20    | 202.20                 | 2.72                                 | 0.22           | 5.95 3.72 3.25          | 5.94            | 3.42            | $V_{22} > V_{11} > V_{33}$                                        | 10.3      | 16.5      | Р             |
|               |                        |                                      | 0.13           | 3.74 6.37 3.42          |                 |                 | $V_{21} = V_{12} > V_{23} > V_{31} = V_{13} > V_{32}$             |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.09           | 3.26 3.16 5.51          |                 |                 | $(V_{21} = V_{12}) > (V_{23} > V_{32}) > (V_{31} = V_{13})$       |           |           |               |
| OKU-247_45    | 247.45                 | 2.70                                 | 0.05           | 5.96 3.68 3.30          | 5.91            | 3.44            | $V_{22} > V_{11} > V_{33}$                                        | 11.3      | 15        | Р             |
|               |                        |                                      | 0.07           | 3.66 6.35 3.32          |                 |                 | $V_{12} = V_{21} > V_{31} > V_{23} = V_{13} = V_{32}$             |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.05           | 3.37 3.28 5.41          |                 |                 | $(V_{12} = V_{21}) > (V_{31} > V_{13}) > (V_{23} = V_{32})$       |           |           |               |
| OKU-319_25    | 319.25                 | 2.62                                 | 0.04           | 6.26 3.78 3.41          | 5.82            | 3.47            | $V_{11} > V_{22} > V_{33}$                                        | 12.9      | 11.9      | Г             |
|               |                        |                                      | 0.12           | 3.60 5.95 3.39          |                 |                 | $V_{12} > V_{21} > V_{13} = V_{23} \sim V_{31} > V_{32}$          |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.07           | 3.35 3.29 5.23          |                 |                 | $(V_{12} > V_{21}) > (V_{13} \sim V_{31}) = (V_{23} > V_{32})$    |           |           |               |
| OKU-351_90    | 351.90                 | 2.75                                 | 0.07           | 6.29 3.82 3.99          | 5.67            | 3.65            | $V_{11} > V_{22} > V_{33}$                                        | 18.2      | 7.5       | Р             |
|               |                        |                                      | 0.11           | 3.63 5.85 3.69          |                 |                 | $V_{13} > V_{12} > V_{23} > V_{21} > V_{31} > V_{32}$             |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.50           | 3.48 3.29 4.87          |                 |                 | $(V_{13} > V_{31}) > (V_{12} > V_{21}) > (V_{23} > V_{32})$       |           |           |               |
| OKU-391_70    | 391.70                 | 2.70                                 | 0.08           | 5.45 3.47 3.11          | 5.50            | 3.34            | $V_{22} > V_{11} > V_{33}$                                        | 13.6      | 17        | Р             |
|               |                        |                                      | 0.05           | 3.69 6.06 3.25          |                 |                 | $V_{21} > V_{12} > V_{32} \sim V_{23} \sim V_{31} > V_{13}$       |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.08           | 3.22 3.28 5.00          |                 |                 | $(V_{21} > V_{12}) > (V_{32} \sim V_{23}) \sim (V_{31} > V_{13})$ |           |           |               |
| OKU-450_55    | 450.55                 | 2.78                                 | 0.45           | 5.47 3.65 3.69          | 5.32            | 3.24            | $V_{22} > V_{11} > V_{33}$                                        | 29.3      | 32.1      | Р             |
|               |                        |                                      | 0.09           | 3.70 6.34 2.68          |                 |                 | $V_{21} = V_{13} \sim V_{12} > V_{32} > V_{31} > V_{23}$          |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.26           | 2.82 2.90 4.15          |                 |                 | $(V_{21} \sim V_{12}) = (V_{13} > V_{31}) > (V_{32} > V_{23})$    |           |           |               |
| OKU-506_10    | 506.10                 | 2.64                                 | 0.20           | 6.34 3.77 3.08          | 5.93            | 3.34            | $V_{11} > V_{22} > V_{33}$                                        | 10.8      | 26.6      | Г             |
|               |                        |                                      | 0.15           | 3.72 6.02 3.12          |                 |                 | $V_{12} \sim V_{21} > V_{31} \sim V_{32} > V_{23} \sim V_{13}$    |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.06           | 3.19 3.17 5.45          |                 |                 | $(V_{12} \sim V_{21}) > (V_{31} > V_{13}) \sim (V_{32} > V_{23})$ |           |           |               |
| OKU-599_00    | 599.00                 | 2.72                                 | 0.05           | 5.73 3.60 3.39          | 5.79            | 3.47            | $V_{22} > V_{11} > V_{33}$                                        | 8.5       | 7.4       | Р             |
|               |                        |                                      | 0.01           | 3.58 6.16 3.44          |                 |                 | $V_{12} = V_{21} > V_{23} = V_{32} \sim V_{13} = V_{31}$          |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.05           | 3.38 3.42 5.47          |                 |                 | $(V_{12} = V_{21}) > (V_{23} = V_{32}) \sim (V_{13} = V_{31})$    |           |           |               |
| OKU-703_25    | 703.25                 | 2.73                                 | 0.14           | 6.18 3.80 3.10          | 5.55            | 3.30            | $V_{11} > V_{22} > V_{33}$                                        | 16.5      | 25.6      | Г             |
|               |                        |                                      | 0.17           | 3.58 5.59 3.07          |                 |                 | $V_{12} > V_{21} > V_{32} > V_{13} = V_{31} = V_{23}$             |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.13           | 3.09 3.15 4.89          |                 |                 | $(V_{12} > V_{21}) > (V_{32} > V_{23}) > (V_{13} = V_{31})$       |           |           |               |
| OKU-801_40    | 801.40                 | 2.76                                 | 0.08           | 5.86 3.48 3.65          | 5.45            | 3.31            | $V_{11} > V_{22} > V_{33}$                                        | 10.1      | 32.4      | Р             |
|               |                        |                                      | 0.13           | 3.58 5.41 3.16          |                 |                 | $V_{13} > V_{21} > V_{12} \sim V_{31} > V_{23} > V_{32}$          |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.28           | 3.44 2.56 5.09          |                 |                 | $(V_{13} > V_{31}) > (V_{21} > V_{12}) > (V_{23} > V_{32})$       |           |           |               |
| OKU-900_25    | 900.25                 | 2.72                                 | 0.22           | 5.05 3.51 2.39          | 4.37            | 2.85            | $V_{22} > V_{11} > V_{33}$                                        | 52.2      | 53.4      | Р             |
|               |                        |                                      | 0.09           | 3.48 5.54 2.44          |                 |                 | $V_{12} \sim V_{21} > V_{31} > V_{32} \sim V_{23} > V_{13}$       |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.46           | 2.83 2.46 2.53          |                 |                 | $(V_{12} \sim V_{21}) > (V_{31} > V_{13}) > (V_{32} \sim V_{23})$ |           |           |               |
| OKU-1000_50   | 1000.50                | 2.72                                 | 0.10           | 6.15 3.71 3.13          | 5.33            | 3.32            | $V_{11} > V_{22} > V_{33}$                                        | 25.6      | 23.2      | Г             |
|               |                        |                                      | 0.22           | 3.67 5.56 3.14          |                 |                 | $V_{12} \sim V_{21} > V_{32} \sim V_{23} = V_{13} = V_{31}$       |           |           |               |
|               |                        |                                      | 0.07           | 3.11 3.18 4.27          |                 |                 | $(V_{12} \sim V_{21}) > (V_{32} \sim V_{23}) = (V_{13} = V_{31})$ |           |           |               |

Примечания.  $V_{pc}$ ,  $V_{sc}$  – средние величины скорости продольных и поперечных волн в образце, соответственно;  $A_p$  – обобщенный коэффициент анизотропии по продольным волнам;  $B_s$  – показатель анизотропии по поперечным волнам; Р, Г – тип симметрии образца: орторомбический, псевдогексагональный соответственно.

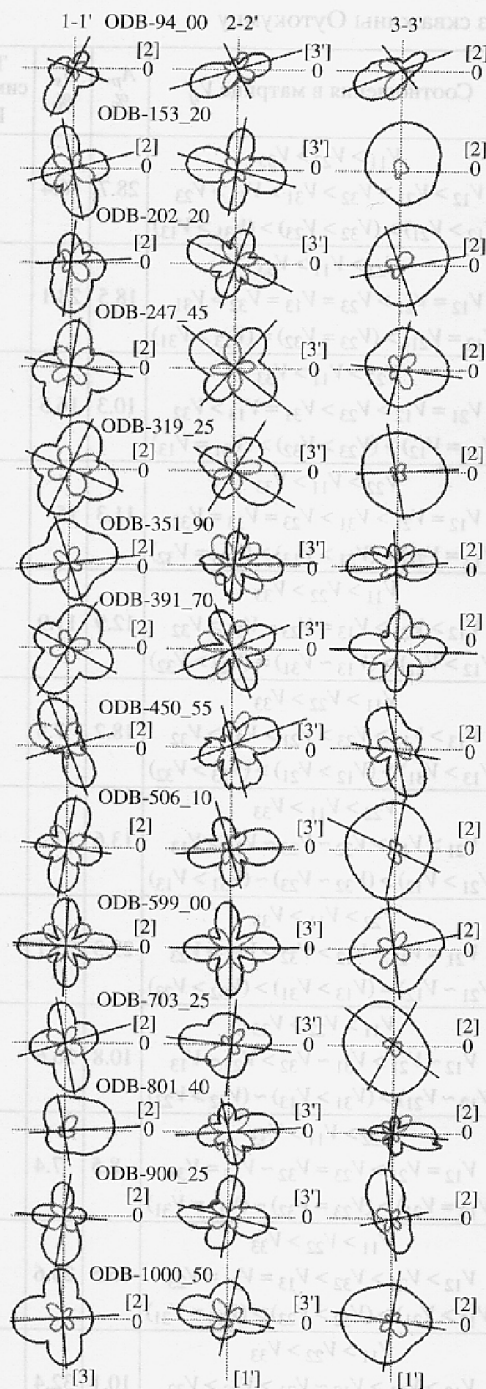


Рис. 3. Акустополариграммы образцов финской скважины OKU.

OKU-94\_00 – фибролит-биотитовый сланец; OKU-202\_20, OKU-247\_45, OKU-391\_70, OKU-506\_10, OKU-1000\_50 – биотитовый сланец с графитом; OKU-153\_20, OKU-319\_25, OKU-599\_00, OKU-703\_25, OKU-801\_40, OKU-900\_25 – гранат-биотитовый сланец с графитом; OKU-351\_90 – гранат-биотит-хлоритовый сланец с графитом; OKU-450\_55 – биотит-силлиманитовый сланец с графитом. Темные линии – векторы параллельны (ВП); светлые линии – векторы скрещены (ВС); линии соединяющие минимумы амплитуды ВС – проекции элементов симметрии.

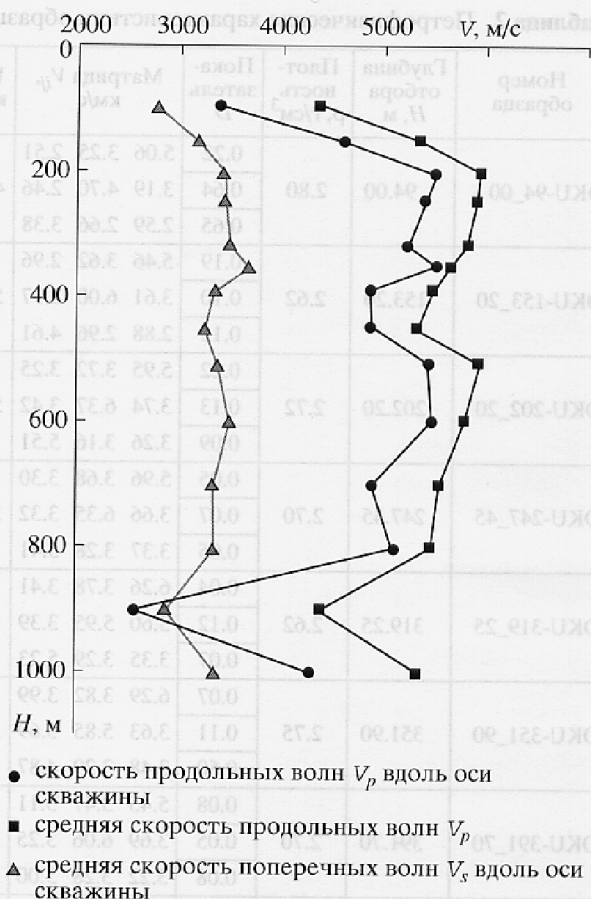


Рис. 4. Величины скорости распространения продольных и поперечных волн в диапазоне глубин до 1 км в скважине OKU.

Величины усредненных скоростей распространения поперечных колебаний в образце  $V_{SR}$  вычисляли по формуле:

$$V_{SR1} = (V_{12} + V_{13})/2; \quad V_{SR2} = (V_{21} + V_{23})/2; \quad V_{SR3} = (V_{31} + V_{32})/2, \quad (5)$$

где  $V_{SR1}$ ,  $V_{SR2}$ ,  $V_{SR3}$  – усредненные скорости распространения поперечных колебаний, измеренные в направлениях 1–1', 2–2', 3–3'.

Вычисленные значения плотности, коэффициентов и показателей анизотропии  $A_p$ ,  $B_s$ , скоростей  $V_{ij}$ , степени ЛААП  $D$  представлены в табл. 2. Акустополариграммы образцов представлены на рис. 3. Зависимости характеристик от глубины скважины для величин скорости распространения продольных и поперечных колебаний показаны на рис. 4; а для параметров анизотропии, плотности образцов – на рис. 5.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных результатов показал, что на характер акустополяриграмм, как правило, влияют шесть, встречающихся в различных сочетаниях факторов: упругая анизотропия, эффект ЛААП, явление углового несогласия направленности элементов упругой симметрии и элементов эффекта ЛААП [3], эффект деполаризации сдвиговых волн (ДСВ), микротрещиноватость и неоднородности.

Из анализа акустополяриграмм следует, что практически все изученные образцы горных пород анизотропны, так как на акустополяриграммах, полученных в положении векторы скрещены (ВС), наблюдаются симметричные четырехлепестковые фигуры (см. рис. 3). Практически во всех случаях проекции элементов упругой симметрии выделяются достаточно четко. При этом на всех акустополяриграммах можно провести прямые линии, соединяющие минимумы изменения амплитуды сигнала, измеренного в положении ВС, и тем самым определить пространственное положение проекций элементов упругой симметрии [2].

Обзор матриц показывает, что каждая из скоростных характеристик пород содержит определенную (детерминированную) и некоторую случайную (флуктуационную) составляющие (см. табл. 2, рис. 3). Флуктуационные составляющие определяются по заметной асимметрии в величинах скоростей относительно главной диагонали матрицы скоростей. При анализе скоростных характеристик каждого образца наблюдается определенная разница в конкретных значениях  $V_p$  и  $V_s$ , представленных в матрицах.

Наибольшая и наименьшая усредненные величины скорости  $V_{SR}$  зарегистрированы в образцах гранат-биотит-хлоритового сланца с графитом (обр. ОКУ-351\_90,  $V_{SR} = 3.90$  км/с) и фибролит биотитового сланца (обр. ОКУ-94\_00,  $V_{SR} = 2.62$  км/с). Наибольшая и наименьшая величины скорости  $V_p$  зарегистрированы в образцах биотитового сланца с графитом (обр. ОКУ-202\_20,  $V_p = 5.94$  км/с) и гранат-биотитового сланца с графитом (обр. ОКУ-900\_25,  $V_p = 4.37$  км/с). Максимальная скорость продольных и поперечных колебаний в образцах ОКУ-94\_00, ОКУ-319\_25, ОКУ-351\_90, ОКУ-506\_10, ОКУ-703\_25, ОКУ-801\_40, ОКУ-1000\_50 зафиксирована в направлении 1-1'. При этом отмечается соотношение  $V_{11} > V_{22} > V_{33}$ . У образцов ОКУ-202\_20, ОКУ-391\_70, ОКУ-599\_00, ОКУ-900\_25 максимальная скорость наблюдается при прохождении колебаний в направлении 2-2'. При этом отмечается соотношение  $V_{22} > V_{11} > V_{33}$ . Такое соотношение сохраняется и для образцов ОКУ-153\_20, ОКУ-247\_50, ОКУ-450\_55, но с тем отличием, что максимальные величины наблюдаются  $V_s$  в направ-

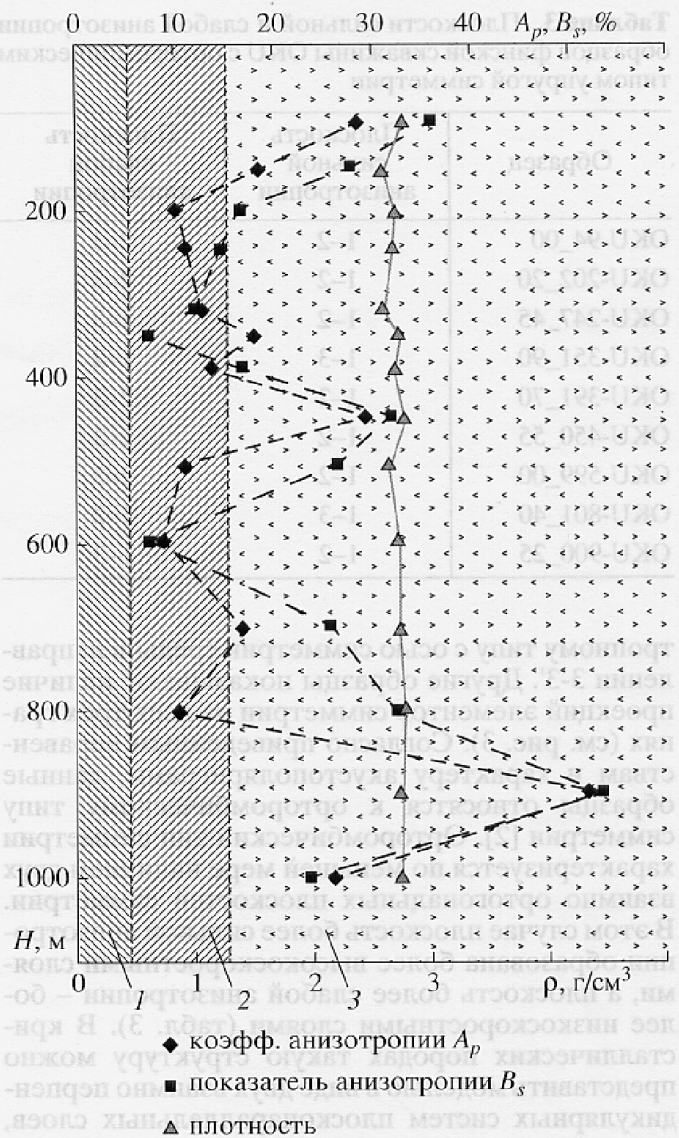


Рис. 5. Зависимость коэффициента анизотропии по продольным волнам  $A_p$ , показателя  $B_s$ , плотности  $\rho$  от глубины  $H$  залегания образцов скважины ОКУ: 1 — область слабой, 2 — средней, 3 — сильной анизотропии.

лении 1-1'. У образца ОКУ-247\_45 усредненные величины  $V_{SR}$  в направлениях 1-1', 2-2' равны ( $V_{SR} = 3.49$  км/с). Во всех случаях соотношения скоростей  $V_{11} > V_{22} > V_{33}$ ,  $V_{22} > V_{11} > V_{33}$  для продольных волн свидетельствуют об орторомбическом типе упругой симметрии образцов [2, 3].

Однако на акустополяриграммах образцов (см. рис. 3, ОКУ-153\_20, ОКУ-319\_25, ОКУ-506\_10, ОКУ-703\_25, ОКУ-1000\_50) в направлении 3-3' наблюдаются минимальные величины амплитуды прохождения волн в положении ВС, а в положении ВП амплитуды практически не изменяются. Пары скоростей распространения сдвиговых волн ( $V_{13}$ ,  $V_{31}$ ,  $V_{23}$ ,  $V_{32}$ ) примерно равны между собой (см. табл. 2). Эти обстоятельства указывают на принадлежность образцов к поперечно-изо-

**Таблица 3.** Плоскости сильной и слабой анизотропии образцов финской скважины ОКУ с орторомбическим типом упругой симметрии

| Образец    | Плоскость сильной анизотропии | Плоскость слабой анизотропии |
|------------|-------------------------------|------------------------------|
| ОКУ-94_00  | 1–2                           | 2–3                          |
| ОКУ-202_20 | 1–2                           | 2–3                          |
| ОКУ-247_45 | 1–2                           | 1–3                          |
| ОКУ-351_90 | 1–3                           | 1–2                          |
| ОКУ-391_70 | 1–2                           | 2–3                          |
| ОКУ-450_55 | 1–2                           | 1–3                          |
| ОКУ-599_00 | 1–2                           | 2–3                          |
| ОКУ-801_40 | 1–3                           | 1–2                          |
| ОКУ-900_25 | 1–2                           | 1–3                          |

тропному типу с осью симметрии среды в направлении 3-3'. Другие образцы показывают наличие проекций элементов симметрии на всех трех гранях (см. рис. 3). Согласно приведенным неравенствам и характеру акустополариграмм, данные образцы относятся к орторомбическому типу симметрии [2]. Орторомбический тип симметрии характеризуется по меньшей мере наличием двух взаимно ортогональных плоскостей симметрии. В этом случае плоскость более сильной анизотропии образована более высокоскоростными слоями, а плоскость более слабой анизотропии – более низкоскоростными слоями (табл. 3). В кристаллических породах такую структуру можно представить моделью в виде двух взаимно перпендикулярных систем плоскопараллельных слоев, каждый из которых может быть образован системами плоскостных или цепочечных минералов, например таких, как слюды, амфибол и др. Для более точного анализа системы симметрии образцов необходимо изготовить из каждого кубический образец, грани которого будут параллельны выявленным элементам симметрии образца и провести последующие акустополаризационные определения.

Во всем диапазоне до 1 км глубины отмечается незначительное отклонение величин скорости распространения продольных и поперечных волн от их усредненного значения в пределах 29% и 26% соответственно (см. табл. 2, рис. 3).

На всех образцах проявляется в различной степени эффект ЛААП (см. табл. 2). Характерный признак его наличия – уплощенная форма акустополариграммы ВП образца. Максимальное проявление ЛААП наблюдается у образца фибролит-биотитового сланца (обр. ОКУ-94\_00, гр. 2,  $D = 0.64$ ; гр. 3,  $D = 0.65$ ). Средняя степень проявления ЛААП (в диапазоне  $0.1 < D < 0.5$  [2]) отмечена в образцах ОКУ-153\_20, ОКУ-202\_20, ОКУ-

450\_55, ОКУ-506\_10, ОКУ-703\_25, ОКУ-801\_40, ОКУ-900\_25. В других образцах степень проявления ЛААП относительно мала ( $D < 0.1$ ). В образце ОКУ\_351\_90 на разных гранях наблюдается очень широкий диапазон изменений степени проявления ЛААП: направление 1-1' практически без проявления ( $D = 0.07$ ); направление 2-2' – со средней степенью проявления ( $D = 0.11$ ); 3-3' – с высокой степенью проявления ( $D = 0.50$ ). Эффект ЛААП при распространении волн через анизотропные среды связан с наличием в породе ориентированных в одном направлении минералов, микротрещиноватости, спайности (биотит, мусковит и др., см. табл. 1). При этом наблюдается правильное чередование одних элементов, вытянутых в определенном направлении, с другими. ЛААП может возникать в связи с проявлением дезинтеграции, образованием систем микротрещин в процессе извлечения образца из скважины и разгрузки его от литостатических напряжений [11].

На акустополариграммах образцов ОКУ-202\_20, гр. 1; ОКУ-450\_55, ОКУ-900\_25, гр. 3 направление наибольшего пропускания ЛААП отклонено от положения проекций элементов упругой симметрии. Такое явление, как правило, регистрируется при угловом несогласии направленности элементов, ответственных за проявление эффекта ЛААП, с элементами упругой симметрии. Чаще всего рассогласование встречается, когда преимущественное направление микротрещин не совпадает с преимущественной ориентацией кристаллоупругих осей минеральных зерен [2].

Характер изменения амплитуды колебаний на акустополариграммах ВС (обр. ОКУ-351\_90, гр. 2; ОКУ-391\_70, гр. 2, 3-3'; ОКУ-391\_70, ОКУ-801\_40, гр. 2) позволяет сделать вывод о наличии явления ДСВ [2]. Проявление эффекта состоит в том, что при распространении поляризованных сдвиговых волн, например в средах с разноориентированными минеральными зернами, происходит деполаризация этих волн [4]. Подобный эффект также можно наблюдать в слоистых средах, если ориентация элементов симметрии материала каждого выбранного слоя не будет совпадать. На акустополариграммах эффект ДСВ выражается в аномальном увеличении минимальных амплитуд в диаграммах ВС. Это явление диагностируется в том случае, когда зарегистрированные минимумы амплитуд на акустополариграмме ВС либо велики, либо совсем не выделяются. Степень проявления этого эффекта позволяет оценить угол разориентировки элементов упругой симметрии в зернах (слоях) моно- и полиминеральных горных пород.

Резкие изломы на акустополариграммах ВП обр. ОКУ-94\_00, ОКУ-351\_90, ОКУ-391\_70, ОКУ-

450\_55, OKU-599\_00, OKU-703\_25, OKU-801\_40, OKU-900\_25 объясняются наличием неоднородностей (см. рис. 3). Кроме неоднородностей на форму акустополариграмм оказывают влияние микротрещиноватость на границах зерен и спайность минералов. Например, образец OKU-94\_00 содержит до 30% биотита и сноповидные агрегаты фибролита. Это привело к существенному снижению величин скорости распространения в нем продольных и поперечных колебаний. Высокое содержание биотита наряду с неоднородностями оказало влияние на акустополариграммы обр. OKU-94\_00, OKU-351\_90, OKU-450\_55, OKU-900\_25 (см. рис. 3), привело к проявлению в образцах эффекта ЛААП и сильному различию в величинах скорости, измеренных на разных гранях образцов. Перечисленные образцы также различаются высокими значениями коэффициента  $A_p$  и показателя анизотропии  $B_s$  (см. табл. 2).

Анализ величин скорости продольных волн, замеренных вдоль оси скважины, не позволяет отметить какую-либо закономерность их изменений с глубиной (см. рис. 4). То же можно заключить и относительно средних величин продольной и поперечной, усредненной по всем трем граням образца, скоростей. В пределах глубин до 1 км основное влияние на эти величины оказывает минеральный состав породы.

По данным рис. 5 можно отметить четкую корреляцию между коэффициентом анизотропии  $A_p$  и показателем  $B_s$ . Принимая во внимание значения коэффициента анизотропии  $A_p$  и показателя  $B_s$ , все изученные образцы скважины OKU можно отнести к упругоанизотропным. Максимальные величины показателей анизотропии  $A_p$  и  $B_s$  наблюдаются у образца гранат-биотитового сланца с графитом (обр. OKU-900\_25,  $A_p = 52.2\%$ ,  $B_s = 53.4\%$ ). Образцы с  $5 < A_p < 15\%$  относятся к слабоанизотропным, а с  $A_p > 15\%$  – к сильноанизотропным [2]. Высокоанизотропные слои пород существенно усложняют интерпретацию сейсмического разреза, полученного с земной поверхности (см. рис. 1). Особенно это относится к части разреза, расположенного ниже анизотропных слоев.

Как отмечено выше, упругая анизотропия образцов, в основном обусловлена минеральным составом пород и в большей мере наличием в них слюд. Заметим, что плотность  $\rho$  (см. рис. 5), как и величины скорости существенно не изменяются с глубиной (см. рис. 4). Это означает, что после выбуривания керна скважины OKU и освобождении от литостатических напряжений на глубинах до 1 км, образцы не разуплотнились (дезинтегрировались).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом на упруго-анизотропные свойства образцов пород, залегающих по разрезу финской скважины Оутокумпу, как правило, влияют шесть встречающихся в различных сочетаниях и степени проявления факторов: упругая анизотропия, эффект ЛААП, явление углового несогласия элементов упругой анизотропии и ЛААП, эффект ДСВ, микротрещиноватость и неоднородности.

Изучение свойств образцов пород из диапазона глубин до 1 км показали, что все они упруго-анизотропны и относятся к поперечно-изотропному и орторомбическому типам симметрии. Коэффициенты анизотропии изменяются в пределах от 7 до 52%. Степени проявления анизотропии упругих свойств в изучаемых образцах распределились следующим образом: 50% образцов относятся к средам с сильной анизотропией; 50% – к средам со слабой и средней степенями анизотропии. Высокоанизотропные слои пород существенно усложняют интерпретацию сейсмического разреза, полученного с земной поверхности.

Практически во всех образцах зарегистрировано проявление эффекта ЛААП. Его проявление в большинстве случаев связано с направленной ориентировкой минеральных зерен слюды и микротрещин. В части образцов зарегистрировано наличие углового несогласия параметров направленности эффекта ЛААП с элементами упругой симметрии и присутствие эффекта ДСВ.

По глубине наблюдается незначительное отклонение средних величин скорости распространения продольных и поперечных колебаний. Эти величины, как и упругая анизотропия образцов, в основном, обусловлены минеральным составом пород. Плотность пород также существенно не изменяется с глубиной.

Авторы выражают благодарность В.Р. Ветрину и Н.Е. Козловой за плодотворную помощь и полезные консультации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 07-05-00100 и гранта Президента РФ МК-1908.2008.5.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волкова Е.А. Поляризационные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1974. 156 с.
2. Горбачевич Ф.Ф. Акустополарископия горных пород. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1995. 204 с.
3. Горбачевич Ф.Ф. Акустополарископия породобразующих минералов и кристаллических пород. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. 140 с.
4. Горбачевич Ф.Ф. Явление деполаризации сдвиговых волн в анизотропных гетерогенных средах // Физика Земли. 1998. № 6. С. 83–90.

5. Горбачевич Ф.Ф., Ковалевский М.В., Тришина О.М. Особенности упругой симметрии кристаллических пород в разрезе финской скважины Оуткумпу // Минералогия во всем пространстве сего слова: Тр. III Фермановской научной сессии, посвященной 50-летию Кольского отделения Российского минералогического общества / Научн. ред. Ю.Л. Войтеховский, А.В. Волошин, О.Б. Дудкин. Апатиты, 27–28 апреля 2006 г. Апатиты: Изд-во "К & М", 2006. С. 154–157.
6. Ковалевский М.В. К вопросу о совершенствовании обработки результатов исследований упругих характеристик горных пород методом акустополарископии // Геология и полезные ископаемые Северо-Запада и Центра России / Ред. Ф.П. Митрофанов, А.В. Базай. Апатиты: МУП "Полиграф", 1999. С. 166–169.
7. Ковалевский М.В. К вопросу о совершенствовании методики исследований упругих характеристик геоматериалов методом акустополарископии // Информационные материалы 12-й научной конференции: структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента / Под ред. И.Н. Бурцева. Сыктывкар: Геопринт, 2003. С. 123–125.
8. Ковалевский М.В., Головатая О.С., Горбачевич Ф.Ф. Автоматический акустополарископ для измерения упругих и неупругих параметров твердых сред // Сб. тр. XI сессии РАО. Т. 2. М.: GEOS, 2001. С. 117–121.
9. Ковалевский М.В., Горбачевич Ф.Ф., Хармс У., Дальхайм Х.-А. Акустополаризационные измерения упруго-анизотропных свойств метаморфизованных пород по разрезу немецкой сверхглубокой скважины КТВ в диапазоне глубин 4100–4700 м // Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Геоакустика: Сб. тр. XV сессии Российского акустического общества. Т. 1. М.: GEOS, 2004. С. 323–328.
10. Результаты изучения глубинного вещества и физических процессов в разрезе Кольской сверхглубокой скважины до глубины 12261 м / Под ред. Ф.П. Митрофанова, Ф.Ф. Горбачевича. Апатиты: Полиграф, 2000.
11. Gorbatsevich F.F. Decompression mechanism of deep crystalline rocks under stress relief // Tectonophysics. 2003. V. 370. № 1–4. P. 121–128.
12. Emmermann R., Lauterjung J. The German Continental Deep Drilling Program KTB: Overview and major results // J. Geophys. Res. 1995. V. 102. № 8. P. 179–201.
13. Heikkinen P.J., Koivisto E., Kukkonen I. FIRE high resolution seismic survey in Outokumpu. Geological Survey of Finland. Report Q10.2/2007/29. Espoo, 2007. P. 17–20.
14. Kern H., Popp T., Gorbatsevich 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. V. 338. P. 113–134.
15. Kretz R. Symbols for rock-forming minerals // Amer. Mineral. 1983. V. 68. P. 277–279.
16. Kukkonen I.T. The Outokumpu deep drilling project – background, aims and current status of drilling. Int. Workshop. Espoo, Finland, Oct. 25–26, 2004. Espoo: Geol. Survey of Finland. Rep. Q10.2/2004/1. P. 9–11.