

Сравнение физических и механических свойств образцов пород из разреза Кольской сверхглубокой скважины и их гомологов с поверхности

И. Трчкова, Р. Живор

Институт структуры и механики пород, Академия наук Чешской Республики, г. Прага

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных определений физических и механических свойств протерозойских и архейских пород из разреза Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) и их гомологов, отобранных с земной поверхности. Определены объемная и удельная плотность, пористость, прочность и деформационные характеристики образцов пород и выполнен сравнительный анализ полученных результатов. Низкие значения прочности, деформационных свойств образцов, отобранных с глубоких участков скважины, по нашему мнению, связаны с разуплотнением, образованием большого числа микротрещин в породе, что вызвано механическим воздействием вибраций при бурении и резким сбросом давления и температуры при извлечении керна на поверхность.

Abstract. The results of experimentally determined physical and mechanical properties of rock samples representing two various units of the Kola Superdeep Borehole (SG-3), Proterozoic and Archaean, and their surface analogues have been presented. The bulk and matrix density, porosity, strength and deformational characteristics for all rock samples have been found and mutual comparison of the results has been carried out.

1. Введение

В рамках исследований, проводимых на образцах пород из Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3), были изучены физические и механические свойства как образцов, извлеченных с различных глубин скважины, так и их гомологов, отобранных с земной поверхности. Определяли объемную и удельную плотность, пористость, показатели прочности на сжатие, измеренные при одноосной и трехосной нагрузках, осевые, поперечные и объемные деформации образцов. Целью исследований являлось получение информации об изменении указанных свойств образцов пород в зависимости от глубины их отбора. Представленные результаты являются важным дополнением к известным данным о физических и механических свойствах образцов СГ-3, полученным аналогичными или косвенными методами, и направлены на лучшее понимание природы различий между свойствами аналогичных пород, извлеченных с разных глубин и с поверхности.

Все лабораторные испытания, описанные в этой работе, были выполнены в соответствии с рекомендуемыми методами Международной Комиссии по стандартизации лабораторных и полевых испытаний механических свойств горных пород.

2. Описание образцов

Для лабораторных испытаний из разреза скважины СГ-3 были отобраны 6 образцов пород без видимых трещин (Trčková, Živor, 2000). Три образца метабазальта (обр. 11645, 13509 и 17050 с глубин 3043, 3530 и 4389 м соответственно) были извлечены из запоярнинской свиты протерозойской части разреза СГ-3. Три образца амфиболита, отобранные с глубин 7951, 8942 и 9904 м (обр. 26823, 31887 и 36585 соответственно), представляли архейские породы. Разуплотнение образцов пород, вызванное бурением и трещинообразованием при поднятии с больших глубин, значительно осложняло их лабораторные испытания.

Поверхностные образцы-гомологи 1/ПК-74, 2/ПЛ-21 и 7/ПЛ-42 раннепротерозойских пород северной части Печенгской структуры были отобраны к северу от СГ-3 в районе реки Коласйоки. Отбор образцов производился из метабазальтов вулканической свиты Коласйоки с сохранением их пространственной ориентировки. Поверхностные гомологи архейских пород, представленные амфиболитами, отобраны: один из района озера Паолойарви – 6/ПЛ-302 и два – из района к югу от хребта Мустатунтури – ПЛ-357 и ПЛ-365 (Trčková et al., 2002b).

Образец с поверхности 7/ПЛ-42 был признан аномальным, поскольку был отобран из зоны с проявлениями карбонатизации и хлоритизации. Этим фактором объясняются низкие значения практически всех измеренных показателей. По этой причине в большинстве случаев результаты испытаний этого образца не учитывали при проведении сравнительного анализа.

3. Методы исследования и аппаратура

В процессе испытаний на первом этапе были определены основные физические свойства пород: удельная и объемная плотность, пористость. Удельную плотность (минеральная плотность) определяли пикнометрическим методом, объемную плотность (масса породы, включающая минеральную основу, микротрещины и др., в единице объема) – методом Архимеда на образцах неправильной формы, покрытых твердым парафином. Пористость (объем всех пор по отношению к общему объему образца) рассчитывали по формуле:

$$n = 1 - \rho_d / \rho,$$

где ρ_d – объемная плотность сухого образца, а ρ – удельная плотность.

Для лабораторных определений прочностных и деформационных свойств пород были приготовлены цилиндрические образцы диаметром 55 и высотой 50 мм. Из керна СГ-3 их выбуривали с помощью алмазного инструмента с заданной ориентацией, параллельной оси скважины. В процессе испытаний образцы нагружались параллельно оси цилиндрического образца. Поверхностные образцы изготавливали с осью цилиндра, параллельной и перпендикулярной к направлению слоистости породы. Это было сделано для последующих определений разницы между прочностными и деформационными свойствами породы в разных направлениях.

Предел прочности пород на сжатие определяли при одноосном и трехосном нагружении при боковом давлении 50 и 100 МПа (всестороннее давление). Для определения деформационных свойств образцов пород СГ-3 применяли три цикла нагружения и разгрузки, а для образцов с поверхности – один цикл. При последнем цикле образцы нагружали до разрушения. Испытания на одноосное сжатие проводили на гидравлическом прессе, развивающем максимальную нагрузку 300 кН.

Испытаниям на трехосное сжатие с одним циклом нагрузки и разгрузки подвергали как глубинные образцы пород, так и их поверхностные гомологи. Для проведения стандартных трехосных испытаний в режиме всестороннего давления до 150 МПа использовали специальную ячейку и гидравлический нагрузочный пресс, создающий максимальную осевую силу сжатия до 3000 кН.

Стандартные определения предела прочности на сжатие породы (без разгрузочных циклов) выполнялись на образцах с поверхности. При этом были получены данные о пределах прочности, необходимые для задания нагрузок в циклах одноосных и трехосных испытаний.

В процессе испытаний продольные (ε_A) и поперечные (ε_L) деформации образцов измеряли при помощи электрических тензометров сопротивления, приклеиваемых на боковые поверхности образца. Объемные деформации ε_V образца рассчитывали на основании продольных и поперечных деформаций как $\varepsilon_V = \varepsilon_A - 2\varepsilon_L$.

По величине деформаций, измеренных при циклах одноосной нагрузки, вычисляли значения модуля деформации E_{def} , модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν . Схема определения модулей и коэффициента Пуассона для случая продольной деформации образца отображена на рис. 1. Общая деформация образца представляет собой сумму упругой и остаточной деформаций – ε_{Ael} и ε_{Aper} или ε_{Le1} и ε_{Lper} , соответственно.

Деформационные характеристики пород рассчитывали по известным формулам:

$$E_{\text{def}} = \sigma_{1,3} / \varepsilon_{A1},$$

$$E = \sigma_{1,3} / \varepsilon_{Ael} = \sigma_{1,3} / [(\varepsilon_{A1} + \varepsilon_{A3})/2 - \varepsilon_{Aper}],$$

$$\nu = \varepsilon_{Le1} / \varepsilon_{Ael} = [(\varepsilon_{L1} + \varepsilon_{L3})/2 - \varepsilon_{Lper}] / [(\varepsilon_{A1} + \varepsilon_{A3})/2 - \varepsilon_{Aper}].$$

4. Результаты экспериментов

Физические свойства образцов пород из скважины СГ-3 и их поверхностных гомологов приведены в табл. 1.

Анализ этих данных показывает, что разница между удельной и объемной плотностью пород из разреза СГ-3 и их поверхностных гомологов невелика, поскольку и те, и другие породы очень плотные. Между объемной плотностью образцов, находившихся в лабораторных условиях и обезвоженных, практически нет никакой разницы. Полученные значения удельной плотности образцов пород из скважины СГ-3 совпадают с литературными данными (Кольская сверхглубокая, 1998) и составляют

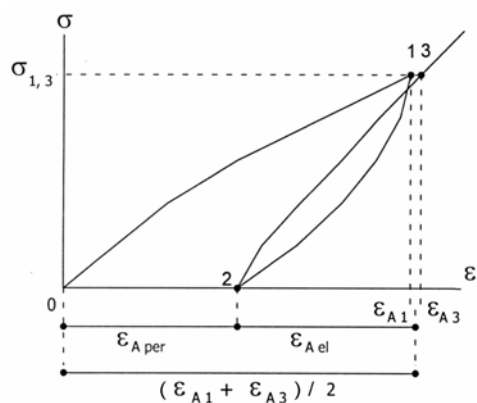


Рис. 1. Изменение осевой деформации образца в процессе одного цикла нагрузки и разгрузки и схема определения деформационных характеристик

2.97-3.14 г/см³, что близко к средней величине 3.00 г/см³ (Лобанов и др., 2000). Плотность образцов не обнаруживает зависимости от глубины, поскольку она определяется минеральным составом породы.

Таблица 1. Физические свойства образцов пород из скважины СГ-3 и их поверхностных гомологов

Образец	Удельная плотность, г/см ³	Объемная плотность, г/см ³		Пористость, %
		Лабораторные условия	Обезвоженные образцы	
11645 (3043 м)	2.97	2.94	2.92	1.68
1/ПК-74	2.98	2.96	2.94	1.28
13509 (3530 м)	3.03	3.02	3.00	0.99
2/PL-21	3.05	3.02	3.02	1.05
17050 (4389 м)	3.14	3.07	3.07	2.23
7/PL-42	2.94	2.91	2.90	1.13
26823 (7951 м)	2.98	2.90	2.90	2.68
6/PL-302	3.09	3.03	3.03	1.94
31887 (8942 м)	3.12	3.02	3.02	3.21
PL-357	3.09	3.05	3.04	1.62
36585 (9904 м)	3.13	3.02	3.02	3.51
PL-365	3.10	3.04	3.04	1.94

Таблица 2. Предел прочности на сжатие (МПа) образцов пород из скважины СГ-3 и их поверхностных гомологов при одноосном и трехосном нагружении

Образец	Одноосное нагружение	Трехосное нагружение при боковом давлении	
		50 МПа	100 МПа
11645 (3043 м)	207.0	409.9	608.7
1/ПК-74	243.1	520.2	665.4
13509 (3530 м)	292.3	596.3	838.5
2/PL-21	344.8	504.6	706.4
17050 (4389 м)	272.3	393.4	697.7
7/PL-42	153.8	409.4	521.6
26823 (7951 м)	164.8	376.8	585.9
6/PL-302	275.4	612.0	810.2
31887 (8942 м)	155.3	517.6	691.5
PL-357	270.3	571.9	830.9
36585 (9904 м)	186.3	436.8	683.2
PL-365	203.8	443.1	592.6

Таблица 3. Предел прочности на сжатие (МПа) поверхностных образцов в двух взаимно перпендикулярных направлениях при одноосном и трехосном нагружении

Образец	Одноосное нагружение	Трехосное нагружение при боковом давлении	
		50 МПа	100 МПа
1/ПК-74	226.4 / 259.8	521.9 / 518.4	681.8 / 648.9
2/PL-21	377.7 / 311.9	494.2 / 515.0	771.1 / 641.8
7/PL-42	166.2 / 141.3	266.1 / 552.8	594.3 / 448.9
6/PL-302	283.8 / 267.0	605.4 / 618.7	871.2 / 749.2
PL-357	291.7 / 248.9	594.9 / 548.9	816.0 / 845.8
PL-365	192.1 / 215.4	411.9 / 474.3	483.0 / 702.3

Примечание: значение прочности образцов в направлении перпендикулярном слоистости пород – над чертой, в направлении параллельном к ней – под чертой.

В то же время пористость пород из разреза СГ-3 медленно возрастает с увеличением глубины, по-видимому, в основном за счет разгрузки образцов от литостатических напряжений в процессе извлечения их на поверхность. Пористость поверхностных гомологов примерно одинакова у всех образцов и в среднем близка к значениям пористости образцов из протерозойской части разреза СГ-3.

Результаты определений предела прочности на сжатие образцов пород из скважины СГ-3 и их поверхностных гомологов при одноосном и трехосном нагружении представлены в табл. 2. Величину прочности на сжатие поверхностных образцов рассчитывали как среднее значение прочности двух образцов, определяемой в одном случае в направлении, параллельном слоистости породы, в другом – в перпендикулярном к ней направлении.

Из полученных данных (см. табл. 2) следует, что прочность на сжатие при одноосном нагружении для трех образцов пород из архейской части разреза СГ-3 значительно ниже, чем у протерозойских пород. Средние значения прочности на сжатие архейских и протерозойских образцов

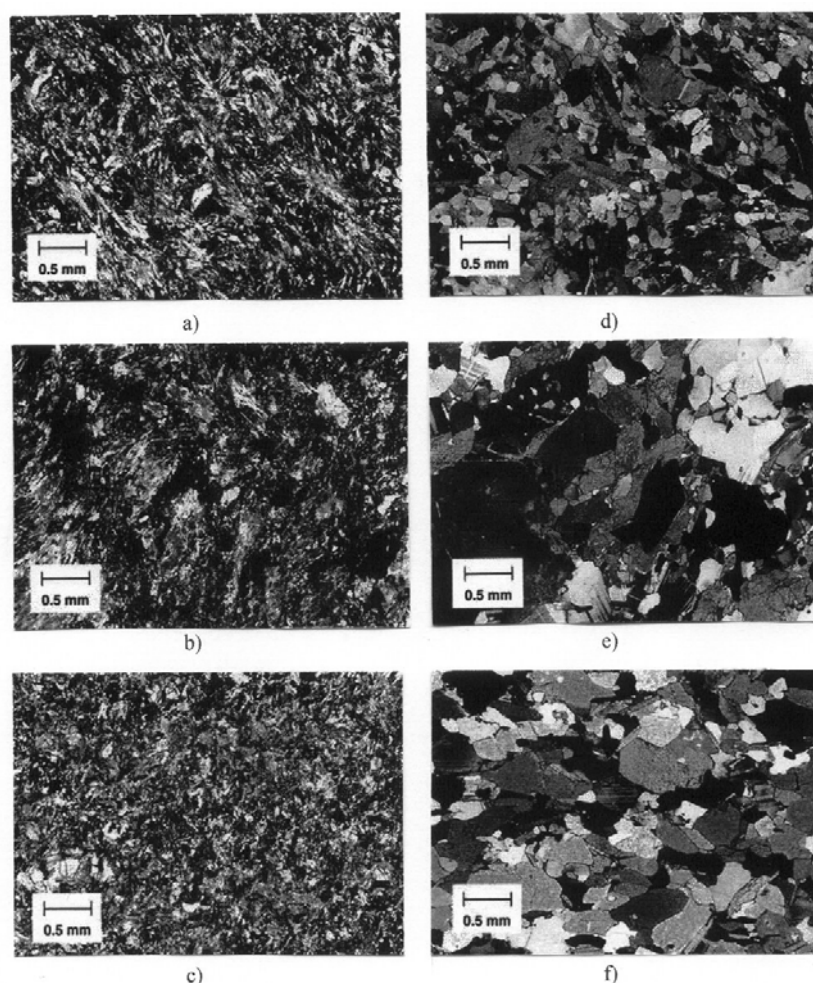


Рис. 2. Фото микроструктуры образцов пород из разреза СГ-3.

a – обр. 11645 (H = 3043 м),
 b – обр. 13509 (H = 3530 м),
 c – обр. 17050 (H = 4389 м),
 d – обр. 26823 (H = 7951 м),
 e – обр. 31887 (H = 8942 м),
 f – обр. 36585 (H = 9904 м)

пород составляют 168.8 и 257.2 МПа соответственно, т.е. разница составляет около 37 %. Это может быть вызвано разуплотнением образцов в процессе их подъема с больших глубин на поверхность. На разуплотнение также влияют различия в микроструктуре по объему образца (рис. 2), пространственное положение основных породообразующих минералов и др. (Trčkova *et al.*, 2002a).

При определении прочности на сжатие поверхностных образцов-гомологов в двух взаимно перпендикулярных направлениях (табл. 3), не обнаружено значительной разницы в полученных результатах. В некоторых образцах зафиксированы более высокие значения прочности в направлении, параллельном слоистости пород, в других – в направлении, перпендикулярном слоистости, причем эта разница много меньше, чем между отдельными образцами в одном направлении.

Средняя величина предела прочности на сжатие при одноосном нагружении у всех поверхностных гомологов одинакова и практически соответствует значениям, полученным для образцов из протерозойской части разреза СГ-3. Величины предела прочности на сжатие при одноосном нагружении образцов из протерозойской и архейской частей разреза СГ-3 аналогичны результатам, полученным путем сравнения и корреляционного анализа данных лабораторных и сейсмоакустических скважинных исследований (Комаров *и др.*, 2000).

Полученные данные (см. табл. 2 и 3) показывают, что приложение всестороннего давления при трехосном нагружении образцов из разреза СГ-3 приводит к повторному уплотнению породы и частичному закрытию микротрещин разгрузки. Средние значения прочности этих образцов примерно одинаковы для протерозойской и архейской частей разреза СГ-3 и составляют 466.5 и 443.7 МПа при всестороннем давлении 50 МПа и 715.0 и 653.5 МПа при всестороннем давлении 100 МПа соответственно. Но значения прочности образцов пород из протерозойской части скважины при трехосном нагружении всегда выше, чем у архейских пород при тех же величинах всестороннего давления.

В отличие от глубоких, поверхностные образцы архейских пород показали более высокие значения прочности при трехосном нагружении, чем образцы протерозойских пород. При всестороннем давлении 50 и 100 МПа значения прочности составили 542.3 и 744.6 МПа соответственно для архейских

пород и 478.1 и 631.1 МПа – для протерозойских. По данным испытаний поверхностных образцов можно считать, что прочность пород на сжатие должна увеличиваться с глубиной. Низкие значения прочности образцов, отобранных с глубоких участков скважины, связаны с разуплотнением, вызванным бурением и резким сбросом давления и температуры при извлечении керна на поверхность.

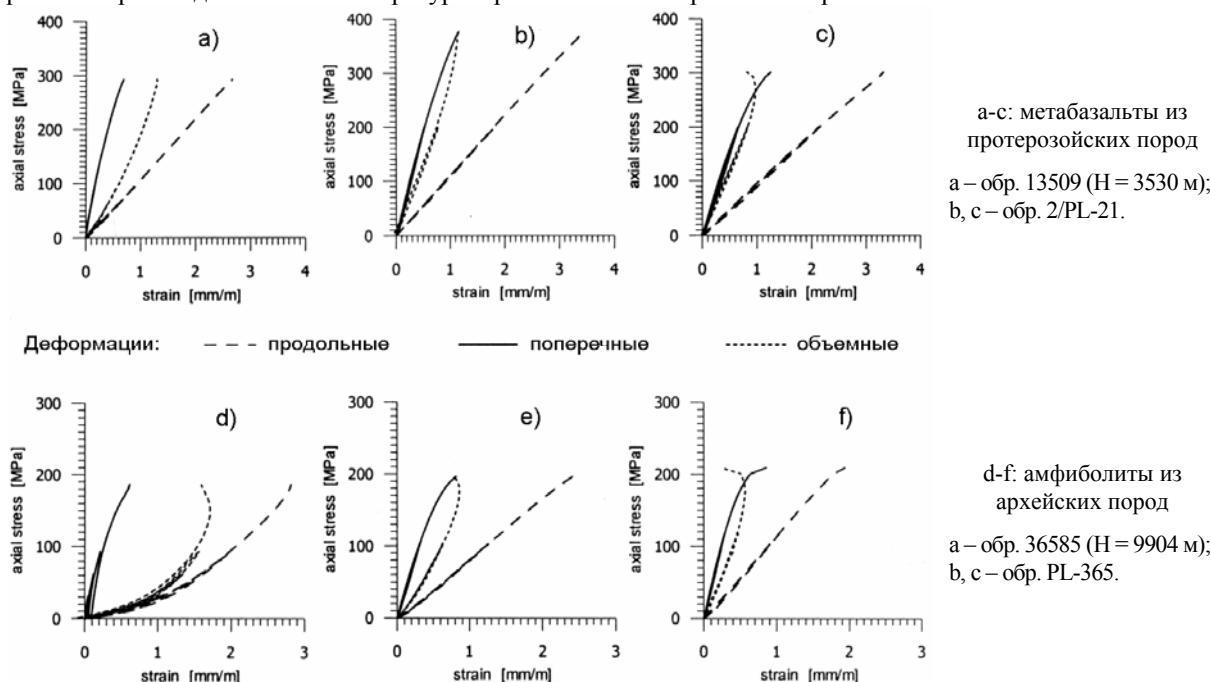


Рис. 3. Зависимости деформаций (strain) от напряжения (stress) для образцов из разреза скважины СГ-3 (a, d) и их поверхностных гомологов. (b, c) и (e, f) – зависимости от нагрузок в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Деформационные характеристики образцов определяли путем измерений деформаций в направлении действия нагрузки и в поперечном направлении. Типичные зависимости деформация-напряжение при испытаниях протерозойских и архейских образцов пород в процессе одноосного нагружения приведены на рис. 3.

Кривая продольной деформации обр. 13509 с глубины 3530 м (рис. 3a) показывает квазилинейную зависимость, что характерно для мелкозернистых неповрежденных изверженных пород (*Lama, Vutukuri, 1978*). Кривая продольных деформаций обр. 36585 с глубины 9904 м (рис. 3d) является выпуклой по отношению к оси деформаций. Это указывает на упрочнение породы при росте нагрузки. Такое поведение отмечено у метаморфических пород (*Lama, Vutukuri, 1978*). Кривые продольных деформаций поверхностных аналогов (рис. 3b, 3c, 3e, 3f) показывают квазилинейную зависимость. Образцы из скважины СГ-3, как и поверхностные, в большинстве случаев имеют низкие величины остаточных деформаций и минимальный гистерезис.

Расчетные деформационные характеристики (модуль деформации E_{def} , модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν) всех образцов, испытанных на одноосное сжатие, приведены в табл. 4. Значения модулей и коэффициента Пуассона поверхностных пород-аналогов представлены в таблице как средние из двух определений, полученных на образцах, приложение нагрузки к которым было выполнено в перпендикулярных направлениях.

Анализ этих данных показал, что из-за малой величины остаточной продольной деформации образцов разница между значениями модулей деформации и упругости (Юнга) незначительна. Величина обоих модулей образцов пород из архейской части разреза СГ-3 намного ниже, чем протерозойских пород (приблизительно на 50 %) и их поверхностных гомологов (примерно на 40 %). Это явление вызвано более высокой продольной деформацией образцов пород из скважины СГ-3, которая примерно вдвое выше, чем у гомологов при тех же нагрузках. Наблюдаемые значительные продольные деформации являются следствием разуплотнения образцов в процессе их извлечения на поверхность из архейской части разреза скважины. Модули поверхностных гомологов близки значениям модуля образцов пород из протерозойской части разреза СГ-3. Значения коэффициента Пуассона образцов из архейской части разреза СГ-3 также ниже, чем у поверхностных гомологов и протерозойских пород.

Деформационные характеристики поверхностных образцов, полученные при нагружении в двух взаимно перпендикулярных направлениях, приведены в табл. 5. Как следует из этих данных, связь между направлением приложения нагрузки и положением плоскости слоистости в целом не прослеживается. Такая зависимость наблюдается только на образце PL-365, для которого модули деформации и Юнга в направлении, перпендикулярном слоистости, на 30 % ниже, чем в направлении, параллельном слоистости.

Таблица 4. Деформационные характеристики образцов пород при одноосном сжатии

Образец	Модуль деформации E_{def} , ГПа	Модуль Юнга E , ГПа	Коэффициент Пуассона ν
1/ПК-74	63.1	73.1	0.23
13509 (H = 3530 м)	104.7	110.4	0.20
2/PL-21	102.2	102.8	0.29
17050 (H = 4389 м)	98.6	106.7	0.33
7/PL-42	56.5	65.1	0.23
26823 (H = 7951 м)	46.9	53.0	0.14
6/PL-302	83.9	92.2	0.28
31887 (H = 8942 м)	44.7	59.9	0.20
PL-357	89.3	95.7	0.23
36585 (H = 9904 м)	65.3	71.9	0.11
PL-365	99.0	102.0	0.24

Таблица 5. Деформационные характеристики образцов поверхностных гомологов, нагруженных в двух взаимно перпендикулярных направлениях

Образец	Модуль деформации E_{def} , ГПа	Модуль Юнга E , ГПа	Коэффициент Пуассона ν
1/ПК-74	59.9 / 66.3	71.2 / 75.0	0.23 / 0.23
2/PL-21	109.5 / 94.8	110.3 / 95.4	0.27 / 0.31
7/PL-42	64.5 / 48.6	70.1 / 60.1	0.22 / 0.24
6/PL-302	88.8 / 79.1	97.6 / 86.9	0.29 / 0.27
PL-357	90.3 / 88.2	95.6 / 95.9	0.25 / 0.21
PL-365	82.1 / 115.8	84.7 / 119.4	0.23 / 0.26

Примечание: значение деформационных характеристик образцов в направлении, перпендикулярном слоистости пород – над чертой, в направлении, параллельном к ней – под чертой.

5. Заключение

Результаты комплексных исследований физических и механических свойств образцов пород из Кольской сверхглубокой скважины и их поверхностных гомологов имеют принципиальное значение для характеристики процессов, происходящих в глубинных зонах континентальной коры. Эти результаты могут дать возможность установить влияние "фактора глубины" на свойства пород.

Несмотря на ограниченное число испытанных образцов, вызванное недостаточным количеством пригодного по размерам каменного материала из разреза Кольской сверхглубокой скважины, испытания позволили установить некоторые различия и сходство между протестированными группами пород. Например, получено, что разница между удельной и объемной плотностью пород из разреза СГ-3 и их поверхностных гомологов невелика, поскольку и те, и другие представляют собой плотные кристаллические породы. Практически нет отличий между объемной плотностью образцов, измеренной в лабораторных условиях и обезвоженных. Полученные величины плотности пород из разреза СГ-3 не обнаруживают зависимости от глубины, однако пористость образцов слегка возрастает с увеличением глубины их извлечения. Значения пористости поверхностных гомологов аналогичны, в среднем, значениям пористости образцов из протерозойской части разреза СГ-3.

Величины предела прочности на сжатие, полученные для образцов керна из архейской части скважины СГ-3 при одноосном нагружении, ниже на 37 %, чем у протерозойских пород. Средние значения предела прочности на сжатие при одноосном нагружении у всех поверхностных гомологов одинаковы и соответствуют значениям, полученным для образцов из протерозойской части разреза СГ-3. При испытаниях на сжатие поверхностных образцов в направлениях, параллельном и перпендикулярном слоистости пород, значительной разницы в величинах пределов прочности не обнаружено.

Значения прочности образцов пород из протерозойской части скважины при трехосном нагружении всегда выше, чем у архейских при тех же величинах всестороннего давления. В отличие от глубинных, поверхностные образцы архейских пород показали более высокие значения прочности при трехосном нагружении, чем образцы протерозойских пород.

Определения деформационных характеристик, выполненные тензометрическим методом, показали, что величины обоих модулей образцов пород из архейской части разреза СГ-3 примерно вдвое ниже, чем протерозойских глубинных пород и их поверхностных гомологов. Модули поверхностных гомологов близки значениям модулей образцов пород из протерозойской части разреза СГ-3. Значения коэффициента Пуассона образцов из архейских пород СГ-3 также намного ниже, чем в других группах образцов.

Низкие значения прочности и деформационных свойств образцов, отобранных с глубоких участков скважины, по нашему мнению, связаны с разуплотнением, образованием большого числа микротрещин в породе, что вызвано механическим воздействием вибраций при бурении и резким сбросом давления и температуры при извлечении керна на поверхность.

Исследования выполнены в рамках проекта МПГК № ЮНЕСКО 408 и при финансовой поддержке Агентства научных грантов Чешской Республики (проект № 205/01/1299).

Литература

- Lama R.D., Vutukuri V.S.** Handbook on mechanical properties of rocks – testing techniques and results. *Trans. Tech. Publications, Clausthal*, v.II, 482 p., 1978.
- Trčková J., Živor R.** Physical and mechanical properties' changes of rocks in function of depth. In: *The result of the study of the deep substance and physical processes in the Kola Superdeep Borehole section down to a depth of 12261 m.* Eds. *Mitrofanov F.P., Gorbatshevich F.F. Apatity, Poligraph*, p.99-100, 2000.
- Trčková J., Živor R., Lobanov K.V., Kazansky V.I., Zharikov A.V., Smirnov Yu.P.** Comparison of elastic properties of the Kola Superdeep Borehole core samples and their surface analogues obtained by static and dynamic measurements. *Acta Montana, Series A*, N 21(125), p.27-54, 2002b.
- Trčková J., Živor R., Příklad R.** Physical and mechanical properties of selected amphibolite core samples from the Kola Superdeep Borehole KSDB-3. *Terra Nova*, v.14, p.379-387, 2002a.
- Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. Под ред. В.П. Орлова, Н.П. Лаверова. М., МФ "Технонефтегаз", 260 с., 1998.
- Комаров В.С., Рабинович Г.Я., Ронин А.Л., Михайлов Г.Н., Блохин Н.Н., Сергеев А.Н., Певзнер С.Л., Смирнов Ю.П.** Изучение зависимости элементного состава поровых растворов от физико-механических свойств горных пород в разрезе Кольской СГ-3. В кн.: *Результаты изучения глубинного вещества и физических процессов в разрезе Кольской сверхглубокой скважины до глубины 12261 м.* Под ред. Ф.П. Митрофанова, Ф.Ф. Горбацевича. Апатиты, Полиграф, с.89-92, 2000.
- Лобанов К.В., Казанский В.И., Кузнецов А.В.** Принципы отбора образцов для сопоставления архейских пород в разрезе Кольской сверхглубокой скважины и на поверхности. В кн.: *Результаты изучения глубинного вещества и физических процессов в разрезе Кольской сверхглубокой скважины до глубины 12261 м.* Под ред. Ф.П. Митрофанова, Ф.Ф. Горбацевича. Апатиты, Полиграф, с.107-109, 2000.