

О плотностных и упруго-анизотропных свойствах пород Кольской сверхглубокой скважины и их поверхностных гомологов

В.Л. Ильченко

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

Аннотация. Проанализированы данные по плотностным и упруго-анизотропным свойствам пород Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) и их поверхностных гомологов. Установлено, что в среднем плотность архейских пород СГ-3 несколько выше, чем у их гомологов с поверхности, а у протерозойских пород из СГ-3 ниже, чем у их гомологов. Установлены существенные различия в распределении пород по анизотропии их упругих свойств. Это распределение для пород СГ-3 аппроксимируется кривой, имеющей вид затухающей волны, что свидетельствует о том, что в совокупность сил и процессов, обуславливающих литосферную геодинамику и определяемых как "фактор глубинности", входит волновая компонента.

Abstract. Analysis of data on density and elastic-anisotropic properties of the Kola Superdeep Borehole (SG-3) core and its rock analogues from the surface has shown some difference in distribution of samples by elastic-anisotropic properties. Distribution by the index of elastic anisotropy for the SG-3 core is approximated by a curve, which has the shape of a damping wave. This is evidence of a wave component presence in geodynamic conditions of the lithosphere determined as a "factor of depth".

1. Введение

Исследованиям физических свойств пород Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) уделялось раньше и уделяется теперь довольно много внимания (*Горбачевич, 1995; Горбачевич и др., 1997*). Можно сказать, что в этом плане породы СГ-3 изучены с большой детальностью. В 2002 году закончились работы по международному проекту № 408 ЮНЕСКО "Сравнение состава, структуры и физических свойств пород и минералов Кольской сверхглубокой скважины и их гомологов на поверхности". Одной из целей проекта была оценка "фактора глубинности" – вариаций физических свойств этих пород, а также характера и причин этих вариаций.

В данной статье приводятся результаты сравнения плотности и показателя упругой анизотропии образцов пород СГ-3 и их поверхностных гомологов. Образцы-гомологи протерозойской части разреза были отобраны практически по прямому профилю СГ-3 – оз. Питьево (г. Заполярный). Но установление точного места выхода на поверхность гомологов пород архейского возраста оказалось спорным. Поэтому образцы с поверхности архейской части разреза, гомологичные по минеральному составу и структуре всем петрографическим разностям, представленным в породах СГ-3, отбирали с поверхности, обрамляющей выходы протерозойских пород с востока, севера и запада (рис. 1). В работе использованы полученные за последние 10 лет данные об анизотропии упругих свойств примерно 200 образцов из эталонной коллекции СГ-3, отобранных по всему разрезу (примерно 16 образцов на 1 км), и более 100 образцов-гомологов с поверхности.

2. Методика исследования

Упруго-анизотропные свойства пород изучались акустопляризационным методом (*Горбачевич, 1995*) на образцах кубической формы. После акустопляризации всех трех пар граней образца, определения скоростей распространения продольных и, в соответствии с выявленными проекциями элементов упругой симметрии, сдвиговых колебаний составляли матрицы величин скорости V_{ij} :

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

где V_{11}, V_{22}, V_{33} – скорости продольных колебаний в направлениях 1, 2, 3 (X, Y, Z) соответственно, а $V_{12}, V_{13}, V_{21}, V_{23}, V_{31}, V_{32}$ – величины скоростей поперечных колебаний, где первый цифровой индекс обозначает направление прозвучивания, а второй – направление элемента упругой симметрии, с которым совмещали плоскость поляризации колебаний источника и приемника во время выполнения измерений.

Затем рассчитывали показатель анизотропии B для каждой пары граней. Например, для грани 1 показатель B равен:

$$B_1 = 2(V_{12} - V_{13}) / (V_{12} + V_{13}). \quad (2)$$

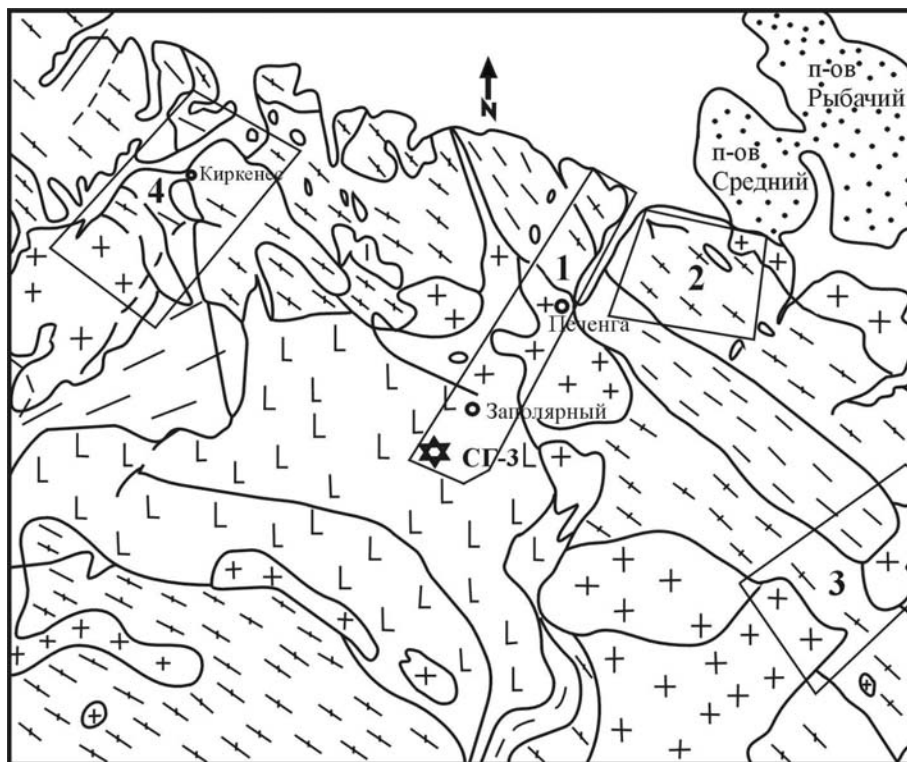


Рис. 1. Геологическая схема района отбора образцов-гомологов керна СГ-3.

Цифрами показаны номера участков отбора образцов:
 1 – Печенгский район,
 2 – район хребта Мустатунтури,
 3 – район массива Партлубол,
 4 – провинция Серварангер (Сев. Норвегия)

Коэффициенты B_2 и B_3 для граней 2 и 3 вычисляли с использованием, соответственно, пар величин V_{21} , V_{23} и V_{31} , V_{32} . Показатель анизотропии B образца является средним геометрическим коэффициентов анизотропии по каждой грани

$$B = (B_1^2 + B_2^2 + B_3^2)^{0.5}. \quad (3)$$

Плотность пород определяли методом Архимеда.

3. Результаты исследования

Для образцов, отобранных с поверхности, в подавляющем большинстве случаев отмечено несовпадение пространственного положения элементов упругой симметрии с ориентировками их текстурных элементов. Установлены значительные вариации плотности и величин показателя упругой анизотропии B пород в выделенных петрографически группах по всему разрезу (рис. 2).

Из более ранних исследований (Горбачевич и др., 1997) известно, что плотность пород из протерозойской части разреза (диабазы и метаосадки) варьирует в пределах 2.7-3.1 г/см³, а величина показателя упругой анизотропии B (за исключением нескольких тектонизированных участков) не превышает 0.08 до глубины 4.43 км, затем резко увеличивается (до 0.65), маркируя Лучломпольский разлом, и до границы с архейскими породами (6.8 км) варьирует в пределах 0.1-0.4. Образцы-гомологи из протерозойской части разреза имеют плотность в пределах 2.8-3.27 г/см³ и показатель $B = 0-0.04$ в местах с ненарушенным первичным залеганием пород и 0.08-0.21 в тектонизированных зонах. В среднем величина показателя упругой анизотропии у образцов из скважины примерно в 5 раз больше, чем у гомологов.

Для архейской части разреза СГ-3 вариации плотности пород составляют 2.63-3.13 г/см³, а показателя $B = 0.02-0.64$. Архейские породы-гомологи с поверхности имеют плотность в пределах 2.55-3.21 г/см³, а их показатель анизотропии B изменяется в пределах 0.01-0.34. В среднем величина B архейских пород-гомологов почти в 3 раза выше для группы гнейсов-гранитов и более чем в 2 раза – для амфиболитов.

В таблице приведены минимальные и максимальные значения плотности и показателя упругой анизотропии B и их средние арифметические величины как для образцов пород из СГ-3, так и для их гомологов. Здесь с не меньшей, чем на рисунке, наглядностью видна разница в вариациях плотностных и упруго-анизотропных свойств глубинных пород и образцов с поверхности. При этом средние значения плотности различаются незначительно, в то время как различия в величине показателя упругой анизотропии, в особенности для пород из архейской части разреза, весьма существенны. Таким образом, напрашивается вывод о том, что анизотропия упругих свойств является наиболее

информативной составляющей при изучении влияния "фактора глубинности", по крайней мере, на физические свойства пород.

Таблица. Вариации плотности и величины показателя упругой анизотропии пород СГ-3 и их гомологов, отобранных с земной поверхности

Породы	СГ-3				Поверхность			
	V		Плотность, г/см ³		V		Плотность, г/см ³	
	min max	средн.	min max	средн.	min max	средн.	min max	средн.
Породы протерозойской части разреза	0.008 0.643	0.315	2.67 3.14	2.89	0.000 0.213	0.064	2.80 3.27	2.97
Гнейсы, граниты и мигматиты из архейской части разреза	0.033 0.447	0.256	2.63 2.83	2.70	0.009 0.339	0.089	2.55 2.93	2.68
Амфиболиты и сланцы из архейской части разреза	0.020 0.635	0.242	2.86 3.13	3.00	0.007 0.340	0.114	2.68 3.21	2.95

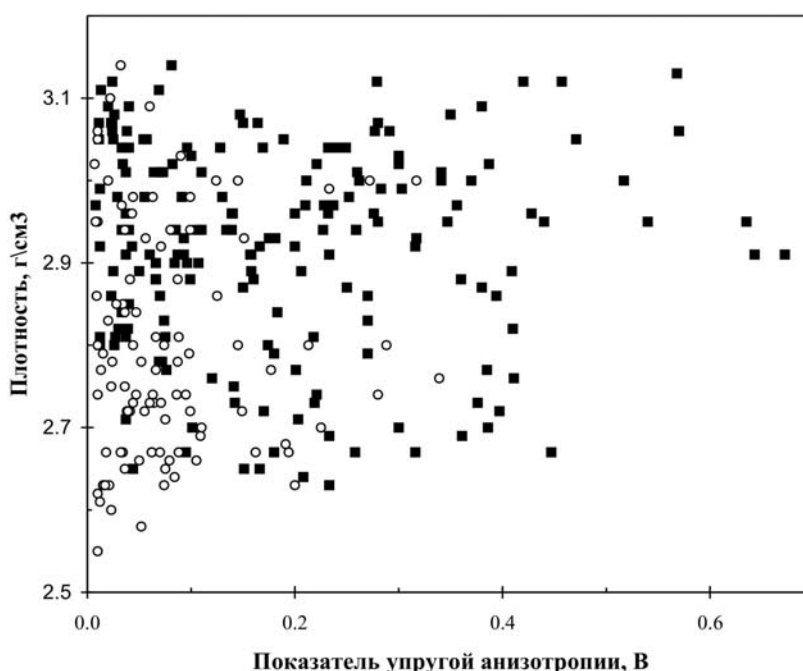


Рис. 2. Значения плотности и показателя упругой анизотропии V пород по всему разрезу СГ-3 (залитые квадратики, около 200 образцов) и их гомологов с земной поверхности (незалитые кружки, более 100 образцов)



Рис. 3. Распределение образцов пород СГ-3, отобранных по всему разрезу скважины (ряд 1) и их гомологов с поверхности (ряд 2) по величине показателя упругой анизотропии V.

Величина показателя анизотропии V: 1. 0-0.05; 2. 0.05-0.1; 3. 0.1-0.15; 4. 0.15-0.20; 5. 0.20-0.25; 6. 0.25-0.30; 7. 0.30-0.35; 8. 0.35-0.40; 9. 0.40-0.45; 10. 0.45-0.50; 11. 0.50-0.55; 12. 0.55-0.60; 13. 0.60-0.65; 14. 0.65-0.70. Сплошная линия – показатель анизотропии для образцов СГ-3, пунктир – для образцов с поверхности.

Для групп архейских сланцев и амфиболитов имеет место слабая тенденция к понижению плотности с повышением показателя упругой анизотропии. Для архейских гнейсов, гранитов и мигматитов эта тенденция выражена значительно слабее, а для протерозойских пород ее не выявлено вовсе и даже наоборот – плотность образцов с поверхности оказалась, в среднем, несколько выше (см. таблицу).

Для выявления диагностических особенностей величин показателя упругой анизотропии было проведено дополнительное валовое сопоставление образцов пород СГ-3 и их гомологов, отобранных с

поверхности (рис. 3). Оно показало, что распределение по величине показателя упругой анизотропии образцов пород СГ-3 существенно отличается от распределения их гомологов, отобранных с поверхности. В то время, как образцы-гомологи по величине показателя упругой анизотропии распределяются по квазигиперболическому или, может быть, экспоненциальному закону, аналогичные изменения для пород СГ-3 описываются волнообразной кривой затухающего колебания.

4. Обсуждение результатов

Упругая анизотропия пород имеет двойственную природу: с одной стороны, она обусловлена их структурно-текстурными (гнейсовидность и др.) характеристиками, с другой – системами микротрещин. Порода, поднятая с больших глубин, испытала тектоно-кессонный эффект (Горяинов и др., 1992) (дилатансия, разуплотнение), и изрядная доля её упругой анизотропии вызвана образовавшимися при этом системами микротрещин. При этом известно, что образцы, отобранные с поверхности, также часто оказываются сильно анизотропными, а элементы их упругой симметрии могут не совпадать с пространственной ориентировкой их текстур: гнейсовидности, сланцеватости и линейности (Воче-ламбинский..., 1991). Очень часто наблюдается несовпадение ориентировок элементов упругой симметрии с ориентировками систем старых, "залеченных", трещин. Совпадение в породах текстурно-структурных и упругих элементов симметрии свидетельствует о том, что, скорее всего, геодинамическая ситуация в месте их дислокации с момента их возникновения никогда существенно не изменялась. Несовпадение пространственных ориентировок породных текстур с элементами упругой симметрии указывает на смену геодинамических режимов и развитие уже сформировавшейся породы в новых условиях, с иными по направлению и силе составляющими поля напряжений. В общем, как в глубинных породах, так и в образцах с поверхности наблюдается одно и то же: на изменение первичного, обусловленного палеонапряжениями и реализованного в текстуре породы пространственного положения элементов упругой симметрии могут влиять только "свежие" (незалеченные) системы микротрещин, вызванные современным напряженным состоянием горного массива.

Проведенное сопоставление (рис. 3) показывает, что между анизотропией упругих свойств пород СГ-3 и его гомологов с поверхности имеется существенное различие. Местонахождение образца, отобранного с поверхности, определяется двумя координатами – X и Y , а зависимость "количество образцов – величина показателя упругой анизотропии" описывается кривой, близкой квазигиперболическому или экспоненциальному распределению. Для пород СГ-3 появляется третья координата, определяющая глубину отбора – Z , и для них аналогичная зависимость описывается уже волнообразной кривой затухающего колебания. Волнообразный характер этой кривой подтверждает гипотезу о волновой природе расслоенности геологических объектов (Ильченко, 1999; 2002). А "фактор глубинности", по-видимому, характеризуют две составляющие: динамическая – волновая, отвечающая за тектоническое расслоение литосферы и статическая – обусловленная силой тяжести, которая подавляет проявление волновой, обеспечивая её затухающий характер.

Волновой характер расслоенности геологических объектов можно рассмотреть и с несколько иной точки зрения, представив (Курс физики, 2002) расслаивающую волну как сложный звуковой тон или сложное колебание, которое может быть разложено на простые гармоники – обертоны, имеющие свои частотные характеристики. Такой набор частот имеет линейчатый характер и называется акустическим спектром (рис. 4).

Проводя аналогию с этими данными можно предполагать, что разделение пород СГ-3 на спектры по величине показателя анизотропии упругих свойств обусловлено сложным колебанием, каждый из обертонов которого натурализован в некотором количестве образцов из определенного "слоя" независимо от их вещественного состава.

Более ярко выраженная упругая анизотропия образцов керна СГ-3, нежели их гомологов с поверхности, объясняется "свежестью" систем микротрещин разуплотнения, которые еще не успели подвергнуться влиянию выветривания и зарастанию вторичными минералами. Пониженная, по сравнению с породами СГ-3, плотность образцов-гомологов архейского возраста, отобранных с поверхности, объясняется, скорее всего, влиянием того же самого выветривания.

5. Заключение

Наиболее важным результатом проведенного исследования является установление волновой природы динамической составляющей "фактора глубинности". Это явление необходимо исследовать

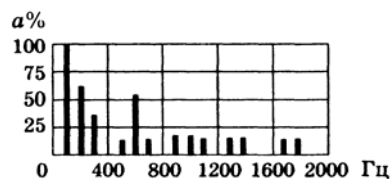


Рис. 4. Акустический спектр ноты (взятой на рояле), представляющей собой сложное колебание

дополнительно, поскольку предполагаемые результаты такого исследования могут быть весьма полезны для развития идей геодинамики, геотектоники, сейсмологии и других наук о Земле, а также для практического применения, например, при строительстве ориентированных на длительные сроки эксплуатации объектов народного хозяйства (захоронение РАО и т.п.).

Благодарности. Автор признателен *К.В. Лобанову* (ИГЕМ РАН, г. Москва) за любезно предоставленную коллекцию образцов-гомологов из района хребта Мустатунтури, *Ю.П. Смирнову* (НПЦ "Кольская сверхглубокая", г. Заполярный) и *В.Р. Ветрину* (ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты) за помощь в выборе мест отбора образцов – гомологов пород СГ-3.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты №№00-05-64057, 03-05-64169 и INTAS-01-0314.

Литература

- П'chenko V.L.** On controlling role of wave influence in stratification of geological objects (experimental data). *Intern. Conf. on Problems of Geocosmos, St.-Petersburg*, p.136-137, 2002.
- П'chenko V.L.** On the wave nature of stratification (experimental data). *Intern. Conf. Early Precambrian: Genesis and evolution of the continental crust. Moscow*, p.59-61, 1999.
- Воче-ламбинский архейский геодинамический полигон Кольского полуострова. *Апатиты, КНЦ РАН*, с.46-53, 1991.
- Горбацевич Ф.Ф.** Акустополарископия горных пород. *Апатиты, КНЦ РАН*, 204 с., 1995.
- Горбацевич Ф.Ф., Медведев Р.В., Смирнов Ю.П.** Упруго-анизотропные свойства керна по разрезу Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3). *Физика Земли*, № 4, с.3-12, 1997.
- Горяинов П.М., Давиденко И.В., Горбацевич Ф.Ф., Ланев В.С., Медведев Р.В., Смирнов Ю.П.** Теоретические и экспериментальные основы тектоно-кессонного эффекта (явления дезинтеграции), геодинамические следствия. Глубинное строение и геодинамика кристаллических щитов европейской части СССР. *Апатиты, КНЦ РАН*, с.136-144, 1992.
- Курс физики. Учебник для вузов. Под ред. А.Н. Ремизова, А.Я. Потапенко. *М., Дрофа*, 720 с., 2002.